



Miguel André Fernandes Buinho

Licenciado em Ciências de Engenharia

**Desenvolvimento da tecnologia
Friction Stir Channelling - estudo da
influência da base no processamento
de ligas de alumínio**

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em
Engenharia Mecânica

Orientadora: Doutora Catarina Isabel Silva Vidal,
Professora Auxiliar, Faculdade de Ciências e Tecnologia
da Universidade Nova de Lisboa

Júri:

Presidente: Prof. Doutora Carla Maria Moreira Machado
Vogais: Prof. Doutor Telmo Jorge Gomes dos Santos
Prof. Doutora Catarina Isabel Silva Vidal

Dezembro 2020



**FACULDADE DE
CIÊNCIAS E TECNOLOGIA
UNIVERSIDADE NOVA DE LISBOA**

Desenvolvimento da tecnologia *Friction Stir Channelling* - estudo da influência da base
no processamento de ligas de alumínio
Copyright © 2020 Miguel André Fernandes Buinho

Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade Nova de Lisboa

A Faculdade de Ciências e Tecnologia e a Universidade Nova de Lisboa têm o direito, perpétuo e sem limites geográficos, de arquivar e publicar esta dissertação através de exemplares impressos reproduzidos em papel ou de forma digital, ou por qualquer outro meio conhecido ou que venha a ser inventado, e de a divulgar através de repositórios científicos e de admitir a sua cópia e distribuição com objetivos educacionais ou de investigação, não comerciais, desde que seja dado crédito ao autor e editor.

“Saber de onde vens, por onde passaste e para onde queres ir é
o primeiro passo para chegar mais longe.”
Sofia N. Nobre

Agradecimentos

Todo o meu percurso académico e o trabalho realizado nesta dissertação, não teria sido possível sem a mentoria, orientação, amizade, paciência e esforço de muitas pessoas.

Gostava de começar por agradecer em especial à Professora Doutora Catarina Isabel Silva Vidal, pela orientação, mentoria, profissionalismo e paciência. Agradeço também a sua disponibilidade e conhecimento técnico que me permitiu concretizar esta dissertação.

Ao Professor Doutor Telmo Jorge Gomes dos Santos pela sua atenção, disponibilidade, e mestria tanto na realização do processamento das ligas de alumínio como nos ensaios não destrutivos realizados.

À Professora Carla Machado gostaria de agradecer toda a disponibilidade e tempo despendido para me auxiliar a mim e aos meus colegas, por todos os fins de semana de trabalho.

Um sincero obrigado ao Eng^o e Mestre Francisco Ferreira principalmente pela partilha de conhecimentos, apoio e disponibilidade, ao Eng^o e futuro Doutor Patrick Inácio agradecer por toda a atenção e generosidade.

Gostaria ainda de deixar um agradecimento ao Sr. Paulo Magalhães e ao Sr. António Campos pela ajuda e auxílio prestado em grande parte dos trabalhos laboratoriais. A todos os meus colegas de laboratório, Duarte Santiago, Pedro Fonseca, Francisco Fialho e todos os outros um grande obrigado pela amizade e entreajuda.

Um profundo obrigado aos meus grandes amigos (Gonçalo, Francisco, Maria Inês, Nicolae, Rodrigo e Sofia), futuros Engenheiros e Engenheiras, por toda a ajuda, amizade, camaradagem e apoio que me deram durante o curso e a dissertação. Em especial aos melhores (Gonçalo, Nicolae e Sofia) que me acompanham há mais tempo e em muito me ajudaram.

À Carolina um sentimento enorme de gratidão, por me ter acompanhado em todo o meu percurso universitário por ter sido o meu pilar, o meu primeiro apoio, por ter sido a primeira pessoa a ouvir-me e por ter estado sempre presente.

À minha família o maior obrigado que alguém pode dar. Aos meus pais, Élide e Augusto, por me terem proporcionado todos os meios que precisei, ajuda e apoio constantes. À minha irmã, Raquel, por ser a primeira a defender-me e a acreditar em mim. Às minhas avós, Élide e Noémia, por terem acreditado sempre no meu potencial e terem sido um apoio constante. Sem vocês nada disto teria sido possível, obrigado.

Resumo

A presente dissertação visa contribuir para o desenvolvimento da tecnologia *Friction Stir Channelling*, que é um processo no estado sólido que permite, através da fricção linear, produzir canais contínuos no interior de uma peça maciça numa única passagem e com a trajetória que se pretender. O intuito específico desta investigação foi avaliar a influência da base (local onde a chapa a processar é fixada) no processo. Para tal optou-se por utilizar duas bases com características térmicas distintas. Sendo uma delas mais convencional (base de aço CK45) e que permite um fácil escoamento do calor, enquanto a outra de um material isolante (baquelite).

Através da análise dos ensaios realizados e da caracterização dos canais produzidos concluiu-se que a base é um fator preponderante para que este processo possa ser realizado com sucesso, pois os ensaios realizados com a base isolante (baquelite) permitiram concluir que o calor excessivo no processo pode impedir a formação de canais. Nesses ensaios foram observadas diversas contraindicações para a utilização deste tipo de base, desde canais não estanques, a canais completamente abertos e instáveis, por não ser possível manter o processo estacionário, verificando-se um aumento constante da temperatura.

Deste modo, desenvolveu-se e produziu-se uma base de cobre refrigerada, com o intuito de se retirar dependência dos parâmetros do processo no fabrico do canal. Assim sendo, o que se espera é que se possa estabilizar a temperatura do processo através da utilização de uma base refrigerada e que os parâmetros do processo possam apenas fazer variar a geometria do canal.

Palavras-Chave

Abertura de canais por fricção linear; Base de aço; Base de baquelite; Caracterização dos canais; Ligas de alumínio

Abstract

This thesis envisages the development of the Friction Stir Channelling (FSC) process, which is a solid-state manufacturing technology. FSC has the ability of producing channels inside monolithic components with any paths, in a single step. The present investigation intended to assess the influence of the base on the aforementioned process. Therefore, the option was to use two different bases, one made of Steel CK45 and other made of bakelite. The bakelite is an insulating material that prevents the heat to flow out.

Based on the experimental tests and channels characterization, it was possible to conclude that the base has a tremendous importance on the channels formation. The tests carried out with the bakelite based were very difficult to control as it was not possible to stabilize the temperature of the process. The use of a bakelite base promotes the production of open or unstainable channels.

Therefore, a copper base with an internal refrigeration system was designed and fabricated in order to better control the temperature of the process and, eventually, reduce the influence of the parameters. It is expected that the process temperature can be stabilized through the base, being the process parameters mainly used to control the geometry of the channels.

Keywords

Friction stir channelling; Steel base; Bakelite base; Channels characterization; Aluminium alloys

ÍNDICE

Agradecimentos	v
Resumo	vii
Palavras-Chave	vii
Abstract	ix
Keywords	ix
Índice	xi
Lista de Figuras	xv
Lista de Tabelas	xix
Nomenclatura	xxi
Abreviaturas	xxi
Símbolos	xxii
1 Introdução	1
1.1 Enquadramento e Motivação	1
1.2 Objetivos	3
1.3 Estrutura da Dissertação	4
2 Revisão do Estado da Arte	5
2.1 Contextualização Histórica	5
2.2 <i>Friction Stir Channelling</i>	6
2.2.1 Breve Passagem pelo FSW	6
2.2.2 FSC with Shoulder-Workpiece Clearance	8
2.2.3 <i>Modified</i> FSC	10
2.2.4 FSC <i>without Shoulder-Workpiece Clearance</i>	10
2.2.5 FSC <i>with</i> stationary shoulder	12
2.2.6 <i>Hybrid</i> FSC	12
2.2.7 Comparação entre Diferentes Técnicas	14
2.3 Aplicações Industriais	14

2.4	Processos Concorrentes.....	15
2.4.1	Furação	15
2.4.2	EDM (Maquinação por Descarga Elétrica)	16
2.4.3	Fresagem	16
2.4.4	Vantagens e Desvantagens do FSC	17
3	Metodologia Experimental	19
3.1	Materiais	19
3.1.1	Ligas de alumínio	20
3.1.2	Bases	20
3.2	Produção de Canais por Fricção Linear.....	20
3.2.1	Equipamento	22
3.2.2	Ferramenta.....	23
3.2.3	Sistema de fixação	24
3.2.4	Medições realizadas durante os ensaios	24
3.3	Ensaios de Estanquicidade.....	25
3.4	Caracterização Metalográfica dos Canais	26
3.5	Rugosidade Interna	27
3.6	Inspeção por Correntes Induzidas	28
3.7	Ensaios de Dureza	31
3.8	Eficiência Energética do Processo	31
4	Resultados Experimentais	33
4.1	<i>Produção de Canais por Fricção Linear</i>	33
4.2	Ensaios de Estanquicidade.....	37
4.3	Caracterização Metalográfica dos Canais	38
4.4	Rugosidade Interna	44
4.5	Caracterização Geométrica dos Canais	44
4.6	Ensaios de Dureza	47
4.7	Inspeção por Correntes Induzidas	48

4.8 Eficiência Energética	50
5 Conclusões e Desenvolvimentos Futuros.....	53
5.1 Conclusões e Comentários Finais	53
5.2 Propostas para Desenvolvimentos Futuros	54
Referências Bibliográficas.....	57

Lista de Figuras

Figura 1-1 – Identificação de tecnologias do estado sólido baseados nos fundamentos da fricção linear [2].	2
Figura 1-2 – Representação esquemática do FSC na variante <i>with shoulder-workpiece clearance</i> [2].	3
Figura 2-1 – Ilustração da Técnica FSW [31].	7
Figura 2-2 - Representação esquemática da secção transversal de um canal produzido pela variante FSC <i>without shoulder-workpiece clearance</i> [17].	8
Figura 2-3 – Ilustração esquemática das duas variantes do MFSC[8].	10
Figura 2-4 – Representação esquemática da variante FSC <i>without shoulder-workpiece clearance</i> , adaptada de [2].	11
Figura 2-5 – Exemplo de uma ferramenta utilizada no FSC <i>without shoulder-workpiece clearance</i> , [2].	11
Figura 2-6 - Variante FSC <i>with stationary shoulder</i> a) imagem do processo, b) esquema explicativo do processo [32].	12
Figura 2-7 – Representação esquemática do pino utilizado no HFSC [13].	13
Figura 2-8 – Representação das diferentes geometria das juntas possíveis na variante HFSC, adaptado de [12].	13
Figura 2-9 – Ilustração explicativa do processo de Furação [34].	15
Figura 2-10- Esquema explicativo do processo EDM [39].	16
Figura 2-11 –Ilustração esquemática do processo de Fresagem [40].	17
Figura 3-1 - a) Fresadora universal com controlo de posição nos três eixos e possibilidade de aplicação de um ângulo de ataque. b) Mesa da fresadora com identificação das zonas de trabalho.	23
Figura 3-2 - Ferramenta utilizada para a produção dos canais.	23
Figura 3-3 - Sistemas de fixação: a) de chapas à base de aço CK45 instrumentada b) de chapas à base de aço CK45 não instrumentada e para a base de baquelite e as chapas nela processadas.	24
Figura 3-4 – Representação esquemática da posição dos termopares.	25
Figura 3-5 – a) Canal não estanque durante o ensaio de estanquicidade b) Aparato experimental do ensaio de estanquicidade.	26

Figura 3-6 – Relação do tamanho do canal vs tamanho da chapa (AA5083-H111).	26
Figura 3-7 - a) Canal antes de seccionar para testes de rugosidade b) Esquema de corte das amostras [2].	27
Figura 3-8 - Comparação da rugosidade das paredes de canais produzidos na liga AA5083-H111 a) A5_71_450 b) B5_71_450.....	28
Figura 3-9 - Plano complexo, com representação dos eixos preferenciais para cada uma das características.	30
Figura 3-10 - Plano complexo, calibrado para ler variações na condutividade elétrica no eixo real.	30
Figura 3-11 - Esquema ilustrativo do método de indentação utilizado nos ensaios de dureza, [18].	31
Figura 3-12 - Metodologia utilizada para o cálculo da eficiência energética.	32
Figura 4-1 – Janela de parâmetros dos ensaios realizados para a Liga AA5083-H111.	34
Figura 4-2 - Janela de parâmetros dos ensaios realizados para a Liga AA2017-T451.	34
Figura 4-3 – Representação gráfica da evolução da temperatura do processo (medida entre a chapa e a base) a) no lado em avanço e b) no lado em retrocesso.	35
Figura 4-4 - <i>Frame</i> do ensaio A5_71_450. Representação do campo de temperaturas na superfície da chapa.	36
Figura 4-5 - Canal não estanque inspecionado visualmente.	37
Figura 4-6 – Macrografia de uma secção transversal do canal produzido no ensaio A2_71_900.	39
Figura 4-7 – Macrografia de uma secção transversal do canal produzido no ensaio B2_71_900.	39
Figura 4-8 – Macrografia de uma secção transversal do canal produzido no ensaio A5_71_450.	39
Figura 4-9 – Macrografia de uma secção transversal do canal produzido no ensaio B5_71_450.	39
Figura 4-10 - Micrografias das principais zonas do canal produzido no ensaio A2_71_900.	40

Figura 4-11 - Micrografias das principais zonas do canal produzido no ensaio B2_71_900.....	41
Figura 4-12 - Micrografias das principais zonas do canal produzido no ensaio A5_71_450.....	42
Figura 4-13 - Micrografias das principais zonas do canal produzido no ensaio B5_71_450.....	43
Figura 4-14 – Representação da geometria típica dos canais e das suas cotas principais.	45
Figura 4-15 - Representação da geometria alternativa dos canais e das suas cotas principais.	45
Figura 4-16 - Representações gráficas da relação da profundidade com a geometria e a dimensão do canal.	47
Figura 4-17 - Representação gráfica dos perfis de dureza.	48
Figura 4-18 – Resultados da inspeção por correntes induzidas relativos à amostra A5_71_450.	49
Figura 4-19 - Correntes induzidas relativas à amostra B5_71_900.	50
Figura 4-20 - Representações gráficas dos dados relativos ao cálculo da eficiência energética.....	52
Figura 5-1- a) Vista em perspectiva do sistema de refrigeração b) Vista superior de um dos possíveis circuitos de refrigeração.	56
Figura 5-2 - Base de cobre com sistema de refrigeração e de fixação finalizada.	56

Lista de Tabelas

Tabela 2-1 - Comparação entre o FSC e técnicas concorrentes (de menor, -, para maior, ++).	18
Tabela 3-1 - Propriedades das ligas de alumínio [41], [42].	20
Tabela 3-2 - Continuação da Tabela 3-1-Propriedades das ligas de alumínio [41], [42].	20
Tabela 3-3 - Identificação dos ensaios realizados na Liga AA5083-H1111 (chapas com 10 mm de espessura).	21
Tabela 3-4 - Identificação dos ensaios realizados na Liga AA2017-T451 (chapas com 8 mm de espessura).....	22
Tabela 3-5 - Geometrias da ferramenta utilizada e os seus componentes.....	24
Tabela 3-6 – Reagente utilizado para contrastar as ligas AA5083-H1111 e AA2017-T451.	27
Tabela 3-7 – Informações das sondas utilizadas (<i>Olympos</i>).....	29
Tabela 3-8 - Penetração de uma percentagem de correntes induzidas em função da sonda.	29
Tabela 4-1 - Valores de rugosidade medidos.	44
Tabela 4-2 – Identificação geométrica dos canais.....	45
Tabela 4-3 - Resultados obtidos nos ensaios de FSC para determinação da eficiência energética do processo.....	51
Tabela 5-1 - Bases das ferramentas concebidas e especificações das suas estrias.	54
Tabela 5-2 - Pinos concebidos e especificações dos perfis de rosca.	55

Nomenclatura

Abreviaturas

CNC	Comando Numérico Computadorizado
EDM	<i>Electrical Discharge Machining</i>
EE	Ensaaios Experimentais
END	Ensaaios Não Destrutivos
FS	<i>Friction Stir</i>
FSC	<i>Friction Stir Channelling</i>
FSP	<i>Friction Stir Processing</i>
FSW	<i>Friction Stir Welding</i>
HII	<i>Heat Input Index</i>
HFSC	<i>Hybrid Friction Stir Channelling</i>
IST	Instituto Superior Técnico
Ra	Rugosidade média
Rmax	Rugosidade máxima
Rq	Desvio médio quadrático
Rz	Rugosidade média de segmentos parciais
TWI	<i>The Welding Institute</i>
ZTA	Zona Termicamente Afetada
ZTMA	Zona Termo-Mecanicamente Afetada

Símbolos

v	Velocidade de avanço [mm.min ⁻¹]
ω	Velocidade de rotação [rev.min ⁻¹]
h_p	Comprimento do pino a partir da estria do <i>shoulder</i> [mm]
h	Espessura da peça [mm]
α	Ângulo de ataque da ferramenta [Rad]
D	Diâmetro do adaptador utilizado nos ensaios de estanquicidade [mm]
δ	Profundidade de penetração do pino [mm]
f	Frequência [Hz]
$\sigma_{\%}$	Condutividade elétrica [%IACS]
μ_r	Permeabilidade magnética relativa
$E_{elé}$	Energia elétrica consumida [J]
P	Potência [W]
t	Tempo [s]
U	Diferença de potencial [V]
I	Corrente elétrica [I]
E_{mec}	Energia mecânica [J]
M	Momento aplicado ao processo [Nm]
F	Força horizontal aplicada ao processo [N]
E_{term}	Energia térmica [J]
m	Massa [g]
c	Calor específico [cal.g ⁻¹ .K ⁻¹]
ΔT	Diferença de temperatura [°C]

Capítulo 1

Este capítulo irá abordar e enquadrar algumas das tecnologias de processamento e soldadura no estado sólido. Apresenta-se a tecnologia *Friction stir Channelling* e as suas variantes, juntamente com a motivação, objetivos e a estrutura do documento.

1 INTRODUÇÃO

1.1 Enquadramento e Motivação

Foram desenvolvidas inúmeras técnicas de produção até aos dias de hoje, as quais podem ser separadas em quatro categorias: adição, remoção, deformação de material e ligação entre elementos distintos. Os avanços científicos atingidos nas diferentes áreas podem ser transferidos ou adaptados a outras, promovendo a criação de novos processos tecnológicos, como por exemplo, o *Friction Stir Channelling* (FSC) em que o material é processado/deformado plasticamente e removido numa única operação (excetuando nas variantes: *FSC with shoulder-workpiece clearance* e *Modified FSC* (MFSC)). O FSC tem por base os princípios do processo de soldadura por fricção linear, sendo realizado no estado sólido, através da ação localizada de uma ferramenta rotativa não consumível. Para além desta, existem outras tecnologias baseadas no referido princípio, sendo algumas delas indicadas na Figura 1-1.

A execução do processo de soldadura por fricção linear ou *Friction Stir Welding* (FSW) em condições não ideais promove a formação de vários defeitos nas juntas soldadas [1]. Um dos defeitos observados trata-se de cavidades ou vazios internos nos cordões de soldadura. Estes devem-se a uma baixa viscosidade e pressão interna que afeta o escoamento do material na zona processada.

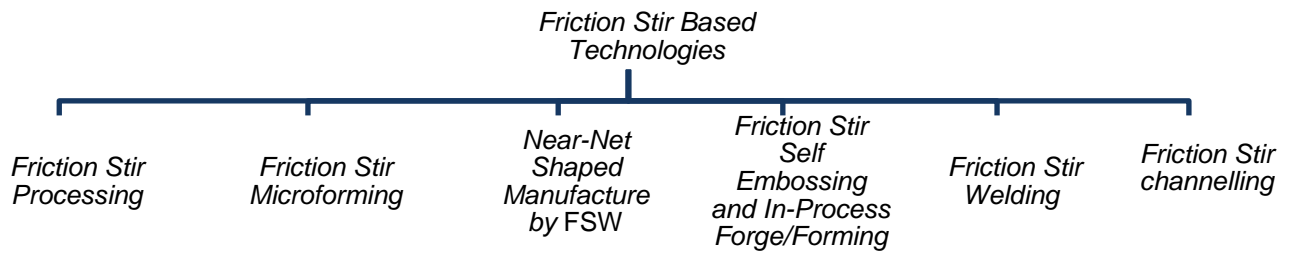


Figura 1-1 – Identificação de tecnologias do estado sólido baseados nos fundamentos da fricção linear [2].

Foi precisamente através da análise deste tipo de defeitos internos que surgiu, inicialmente, a tecnologia FSC [3]. Adaptando os parâmetros do processo e a ferramenta (base + pino) verifica-se que é possível abrir canais no interior de uma peça com geometrias complexas que ultrapassam as capacidades de outras tecnologias, como por exemplo, o *Electrical Discharge Machining* (EDM) [4].

Este processo aporta uma série de vantagens, nomeadamente no que diz respeito à produção de canais de refrigeração e aquecimento [4], pelo que tem vindo a ser alvo de investigação e desenvolvimento, quer científicos quer tecnológicos, por parte da comunidade científica, com o objetivo de entender melhor a influência dos diferentes fatores envolvidos, para que este processo possa vir a ser implementado na indústria.

Existem diferentes variantes desta tecnologia, nomeadamente, FSC *with shoulder-workpiece clearance* [5], [6], *Modified FSC* [7], [8], FSC *without shoulder-workpiece clearance* [9]–[11], *hibrid FSC* [12], [13] e FSC *with stationary shoulder* [14]. Na Figura 1-2 ilustra-se a técnica FSC na sua vertente *with shoulder-workpiece clearance*.

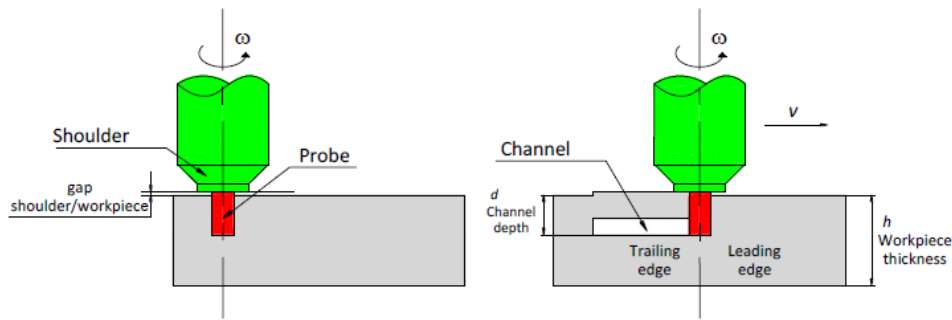


Figura 1-2 – Representação esquemática do FSC na variante *with shoulder-workpiece clearance* [2].

O FSC tem vindo a ser estudado desde 2005, tendo sido publicado o primeiro artigo científico apenas em 2009 [5]. Desde então já foram publicados vários artigos científicos [5], [6], [8], [10]–[12], [15]–[26], 4 patentes [3], [14], [27], [28] e elaboradas teses de mestrado e doutoramento em diferentes Universidades [2], [4], [13], [29]. Alguns dos estudos publicados serão abordados no Capítulo 2 deste documento.

Os constantes progressos na indústria transformam-na, tornando-a mais exigente e criando possibilidades de inovação e desenvolvimento de novas técnicas, como o FSC. Esta tecnologia pode vir a ter uma grande importância na indústria, por exemplo, nas reduções consideráveis dos tempos de injeção quando aplicada na indústria dos moldes, pois permite que os canais de refrigeração destes sejam ajustáveis ao molde, o que pode ainda levar a um melhor acabamento superficial devido às descidas de temperatura mais controladas que esta tecnologia pode proporcionar.

1.2 Objetivos

O principal objetivo deste trabalho é avaliar a influência da base no processo de abertura de canais por fricção linear, ou seja, estudar a importância do calor escoado por esta na formação dos canais. No entanto, para se realizar um estudo sobre o FSC convém também estudar os canais obtidos e as suas propriedades. Em suma, os objetivos desta dissertação são:

- Identificar as principais características pretendidas para as bases e selecionar os materiais a utilizar.
- Monitorizar o campo de temperaturas do processo e realizar a ligação entre estes e as bases utilizadas.

- Caracterizar os canais obtidos, utilizando ensaios de estanquicidade e de dureza, efetuando ainda a caracterização metalográfica, a inspeção por correntes induzidas e as medições das rugosidades internas.
- Determinar a eficiência energética do processo e enquadrar o resultado nas eficiências energéticas obtidas no processo *Upstream Friction Stir Processing*.
- Identificar as janelas de parâmetros para as ligas de alumínio e bases utilizadas.

1.3 Estrutura da Dissertação

Esta dissertação é composta essencialmente por 5 partes. Nesta subsecção será explicado o que foi abordado em cada uma destas partes.

No Capítulo 2 realizou-se um resumo sobre o que é o *Friction Stir Channelling* (FSC), de como surgiu, quais as suas variantes e os principais estudos realizados na área. Na sequência, abordou-se as aplicações industriais, uma comparação qualitativa entre esta e técnicas concorrentes e as suas vantagens e desvantagens.

No Capítulo 3 identificou-se e sistematizou-se todo o procedimento que foi realizado ao longo da dissertação, incluindo as justificações necessárias para as decisões tomadas. Neste capítulo abordou-se as metodologias adotadas e os equipamentos utilizados nos ensaios de FSC, estanquicidade, caracterização metalográfica, rugosidade interna, dureza, inspeção por correntes induzidas e determinação da eficiência energética do processo. No Capítulo 4, analisaram-se e discutiram-se os resultados obtidos.

Por fim, no Capítulo 5 apresentam-se as conclusões e os trabalhos futuros com origem nesta dissertação, alguns dos quais baseados na base refrigerada e ferramentas desenvolvidas.

Capítulo 2

Neste capítulo será realizada a contextualização histórica do FSC, um resumo dos parâmetros do processo desta tecnologia, tal como a explicação detalhada desta técnica e das suas variantes, apresentando ainda alguns dos estudos realizados nesta área. Estas serão comparadas entre si, assim como com as técnicas concorrentes. Apresenta-se, também, uma síntese das possíveis aplicações industriais do FSC.

2 Revisão do Estado da Arte

2.1 Contextualização Histórica

Como referido no Capítulo 1, o FSC foi inicialmente desenvolvido tendo por base os defeitos internos – vazios – que se podem formar nas juntas soldadas por fricção linear. Este processo de soldadura (FSW) foi patenteado pelo *The Welding Institute* (TWI) em 1991 [1]. Em 2005, Mishra propôs e patenteou o FSC [3] como método de fabricação de permutadores de calor, mas só em 2009 é que foi publicado por Balasubramanian *et al.* [5] o primeiro estudo sobre a caracterização dos canais produzidos segundo o conceito patenteado (*with shoulder-workpiece clearance*), sendo estas as datas consideradas da invenção do processo e do primeiro artigo publicado, respetivamente.

O *Modified Friction Stir Channelling* (MFSC) [7] é uma variante que utiliza uma base da ferramenta não estriada, um pino não roscado que pode ter duas geometrias: cilíndrico, na qual se aplica um ângulo de ataque (eliminando assim a distância deixada entre a base da ferramenta e o material de base na variante anterior) ou um pino cónico (invertido) sem a aplicação de um ângulo de ataque [8].

Em 2012, Catarina Vidal e Pedro Vilaça desenvolveram um novo conceito, designado FSC *without shoulder-workpiece clearance*, patenteado pelo Instituto

Superior Técnico (IST) [27]. Em 2018, o TWI patenteou uma nova vertente desta tecnologia (*FSC with stationary shoulder*) [28], que consiste numa nova adaptação da ferramenta que se diferencia essencialmente na maneira de remover o material do canal.

Em 2019 deu-se o último progresso conhecido, com o surgimento do *Hybrid Friction Stir Channelling* (HFSC) [28], que se caracteriza pela combinação dos processos FSW e FSC, da geometria dos seus pinos e fluxos de material.

2.2 *Friction Stir Channelling*

Os parâmetros do processo de abertura de canais internos por fricção linear podem ser divididos em duas categorias principais e secundários, estas são:

Parâmetros principais:

- Geometria da ferramenta e sentido de rotação;
- Velocidade de avanço (da ferramenta ou da mesa de trabalho), (v) [mm/min];
- Velocidade de rotação da ferramenta, (ω) [rev/min];
- Material de base;
- Controlo de posição ou de força;

Parâmetros secundários:

- Espessura da peça, (h) [mm];
- Ângulo de ataque da ferramenta;
- Trajetória;
- Equipamento;
- Material da ferramenta;
- Comprimento do pino [mm];
- Força vertical da ferramenta [N];
- Penetração do pino [mm].

2.2.1 Breve Passagem pelo FSW

O FSW, como referido anteriormente, surgiu em 1991 e desde então tem sido alvo de diversas investigações, e aplicado em diversas indústrias [1].

A técnica FSW (1991) foi desenvolvida pelo TWI, tendo a particularidade de promover a união entre os dois componentes através de um pino em rotação que avança

ao longo da junta a soldar, Figura 2-1. Deste modo, o material que está à volta do pino atinge temperaturas de entrada em regime visco-plástico, promovendo a mistura e a ligação do material processado. A ferramenta, para além de promover a fricção nos bordos a ligar, garante uma pressão adequada para manter as duas peças à mesma cota e constranger o fluxo de material.

O processo é destinado essencialmente para juntas topo a topo e para chapas de espessura tipicamente reduzida. Para além de não precisar de gases de proteção, garante uma soldadura com boas propriedades mecânicas e permite soldar quer juntas similares, quer juntas dissimilares [30].

Tal como seria de esperar, esta técnica abriu caminho para novas investigações e desenvolvimento de novos processos. Um destes processos é o FSC, objeto de estudo do presente trabalho.

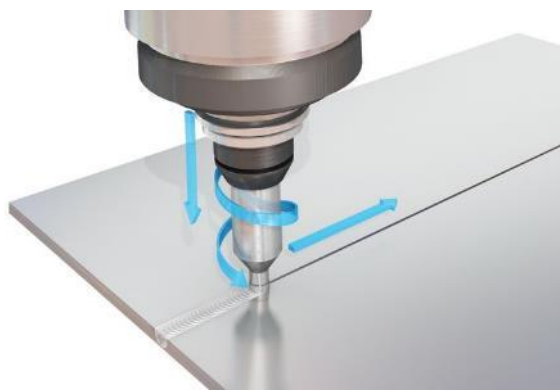


Figura 2-1 – Ilustração da Técnica FSW [31].

Assim como no FSW, o processo FSC cria diferentes zonas microestruturais no local processado e na sua vizinhança, tal como ilustrado na Figura 2-2, onde (A) designa o material base, (B) a zona termicamente afetada (ZTA), (C) a zona termo-mecanicamente afetada (ZTMA) e (D) a zona de recristalização dinâmica (*nugget*).

A zona B, ZTA, é uma zona afetada apenas pela temperatura. Pelo que, como consequência das temperaturas atingidas durante o processo, existem alterações a nível de microestrutura, o que por sua vez provoca alterações nas propriedades

mecânicas ao longo da zona. Existe uma zona onde a temperatura já não é suficiente para promover as alterações na microestrutura, trata-se da zona A.

A zona C, ZTMA, é a zona afetada tanto termicamente como mecanicamente, esta sofre uma grande deformação plástica a uma elevada temperatura, no entanto não ocorre recristalização dinâmica do material.

Por último, na zona D encontra-se o *nugget*. Nesta zona o material está em contacto direto com a ferramenta, pelo que é o local onde se desenvolve maior temperatura e deformação. Dá-se também uma recristalização dinâmica, o que resulta numa microestrutura muito fina e equiaxial.

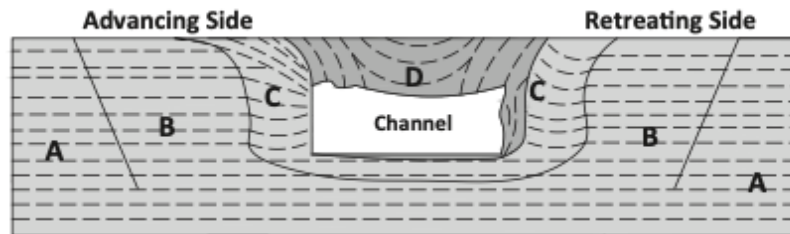


Figura 2-2 - Representação esquemática da secção transversal de um canal produzido pela variante FSC *without shoulder-workpiece clearance* [17].

2.2.2 FSC with Shoulder-Workpiece Clearance

Como referido anteriormente, o FSC possui algumas técnicas de implementação que divergem entre si no que toca, principalmente, à geometria do pino, à inclinação relativa à peça ou à forma de extração do material do canal produzido. A primeira metodologia desenvolvida foi aplicada inicialmente em ligas de alumínio e é conhecida como FSC *with shoulder-workpiece clearance* [5].

Esta variante assenta os seus princípios na produção de canais em peças metálicas através de um pino roscado não consumível que possui movimento de rotação e translação. Esta ferramenta promove a fricção com o material em contacto, criando uma zona visco-plástica. Nesta zona o material adquire energia suficiente que provém não só da fricção do pino como também da energia dissipada na deformação plástica do material de base. Dado a conjugação do perfil roscado do pino com o seu sentido de rotação (rosca esquerda e sentido de rotação anti-horário), o material adquire um movimento ascendente até encontrar a base da ferramenta, onde começa a ser depositado numa cota superior à superfície plana da chapa. A energia em jogo gera temperaturas que levam o material além da temperatura de recristalização, mas

mantém-no abaixo da temperatura de fusão. Dado que o calor gerado pela fricção do pino tende para zero à medida que se aproxima da temperatura de fusão, esta limita a temperatura máxima que é possível atingir na zona de processamento. O que permite concluir que o material não consegue atingir a fusão apenas com base na deformação plástica, permanecendo sempre num estado visco-plástico [2].

O FSC *with shoulder-workpiece clearance* é uma técnica inovadora, que abriu possibilidades a grandes aplicações no ramo da Engenharia Mecânica, especialmente na Tecnologia Mecânica de Fabrico, produzindo canais que possibilitam a passagem de cablagem no interior de estruturas metálicas, criação de sistemas de aquecimento/refrigeração entre outras aplicações. Porém, foi rapidamente ultrapassada por outras vertentes que permitiram a evolução desta técnica.

Ainda assim, realizaram-se diversos estudos de índole científica para se compreender melhor o funcionamento da técnica e como era possível melhorá-la. Em 2009, Balasubramanian *et al.* [5] caracterizaram os canais obtidos por FSC numa Liga comercial AA6061, chegando à conclusão de que estes são contínuos e estanques, podem ser realizados em trajetórias lineares ou curvilíneas. Concluiu-se que a forma do canal pode ser modificada com a alteração de parâmetros, como por exemplo, o aumento da velocidade de avanço ou a diminuição da velocidade de rotação da ferramenta que levam a um aumento do tamanho do canal. Neste estudo observou-se que os diâmetros hidráulicos¹ obtidos variavam entre 0,2 mm e 1,2 mm.

Em 2011, os mesmos autores voltaram a estudar este processo, utilizando o mesmo material de base, mas com o intuito de perceber as forças envolvidas no processo [6]. Sabendo a magnitude e a direção da força resultante no pino, torna-se possível entender melhor o comportamento do escoamento do material e a ocorrência de canais no *nugget*. Este estudo permitiu perceber a posição da força resultante aquando da existência de canais na zona do *nugget* ou, no caso, de *nugget* com canais parciais. Concluiu-se ainda que quanto maior a temperatura do processo, menor é a magnitude da força resultante no pino [6].

¹ Diâmetro hidráulico – Diâmetro de uma tubagem/duto equivalente a uma de secção não circular.

2.2.3 Modified FSC

MFSC é uma técnica que utiliza pinos sem rosca, que podem ser cilíndricos (SCP) ou cônicos invertidos (UCP). Nos primeiros é necessário aplicar um ângulo de ataque à ferramenta, ao contrário dos segundos, Figura 2-3.

Em 2013 foi publicado o primeiro artigo relacionado com o MFSC [7], este estuda a formação dos canais criados por esta técnica, assim como o fluxo do material processado.

Em 2015, Rashidi *et al.* [8] publicaram um artigo em que se analisou as diferenças dos resultados obtidos utilizando dois pinos de geometrias diferentes, SCP e UCP, e em trajetórias lineares e não lineares. Os autores concluíram que o pino cônico (UCP) permite a produção de canais com maior altura e maior diâmetro hidráulico, devendo-se estes factos a um aumento do fluxo do material em comparação ao pino cilíndrico (SCP). Neste estudo observa-se que utilizando o UCP se consegue produzir canais de geometria estável ao longo de trajetórias não lineares.

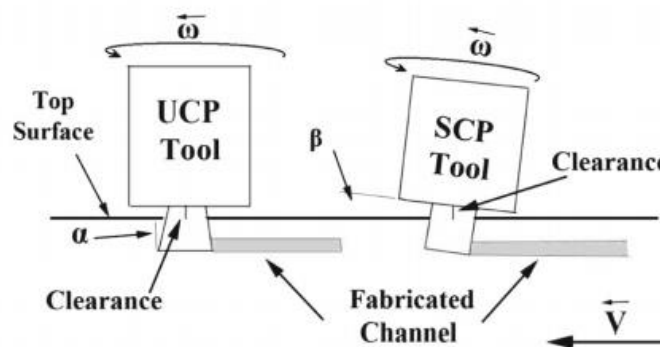


Figura 2-3 – Ilustração esquemática das duas variantes do MFSC[8].

2.2.4 FSC without Shoulder-Workpiece Clearance

Esta técnica é em tudo semelhante à primeira, com apenas duas diferenças. Tal como no FSC *with shoulder-workpiece clearance*, quer retirar-se o material do interior da peça, mas desta vez não se pretende deixar esse material na superfície de trabalho, para isso altera-se a base da ferramenta (adicionando uma ou mais estrias) e reduz-se para zero a distância entre o material e a base da estria da ferramenta, Figura 2-4 e Figura 2-5, para remover o excesso deixado. Assim conseguem-se resultados de canais semelhantes, mas com uma superfície à cota da inicial [2].

Esta foi patenteada em 2012 [27], como referido anteriormente. Nos últimos anos tem sido alvo de diversos estudos e alguns artigos publicados. Em 2014, Vidal *et al.* avaliaram o comportamento à fadiga de canais internos produzidos por FSC, na sua variante *without shoulder-workpiece clearance*, e ainda nesse ano os mesmos autores estudaram o comportamento à fadiga dos canais a elevadas temperaturas. Em ambos os estudos foi utilizado como material de base, a liga de alumínio AA5083-H111 [11], [15].

No primeiro destes estudos concluiu-se que o processamento por FSC de um material de base reduz a sua resistência à fadiga. As fissuras encontradas localizam-se na fronteira entre o *nugget* e a ZTMA no lado em avanço, numa zona interior da peça, cuja orientação depende da geometria do canal que por sua vez varia com os parâmetros do processo [11].

No segundo, chegou-se à conclusão de que para as mesmas condições, mas com temperaturas de teste mais elevadas dá-se a diminuição do tempo de vida à fadiga [15].

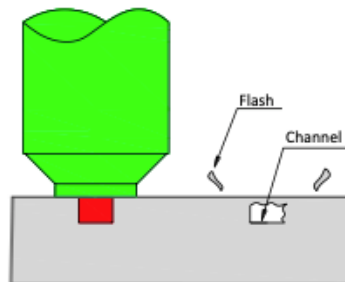


Figura 2-4 – Representação esquemática da variante FSC *without shoulder-workpiece clearance*, adaptada de [2].



Figura 2-5 – Exemplo de uma ferramenta utilizada no FSC *without shoulder-workpiece clearance*, [2].

2.2.5 FSC with stationary shoulder

A variante *FSC with stationary shoulder* teve a sua patente publicada em maio de 2018 [28], mas ainda não foi divulgado nenhum artigo científico com desenvolvimentos da mesma.

A grande diferença desta técnica em relação às restantes é a utilização de uma base da ferramenta (*shoulder*) estacionária combinada com o facto de manter o material extraído da peça confinado dentro da base da ferramenta, o que potencialmente pode aumentar as pressões no interior da peça e permitir controlar melhor a extração do material. Este tomará o caminho de duas saídas estrategicamente colocadas. Como consequência ganha-se um melhor controlo sobre o material extraído, o que deve refletir maior precisão nas dimensões dos canais mas aumenta a probabilidade do material retirado soldar à base da ferramenta ou aos canais de saída, Figura 2-6.

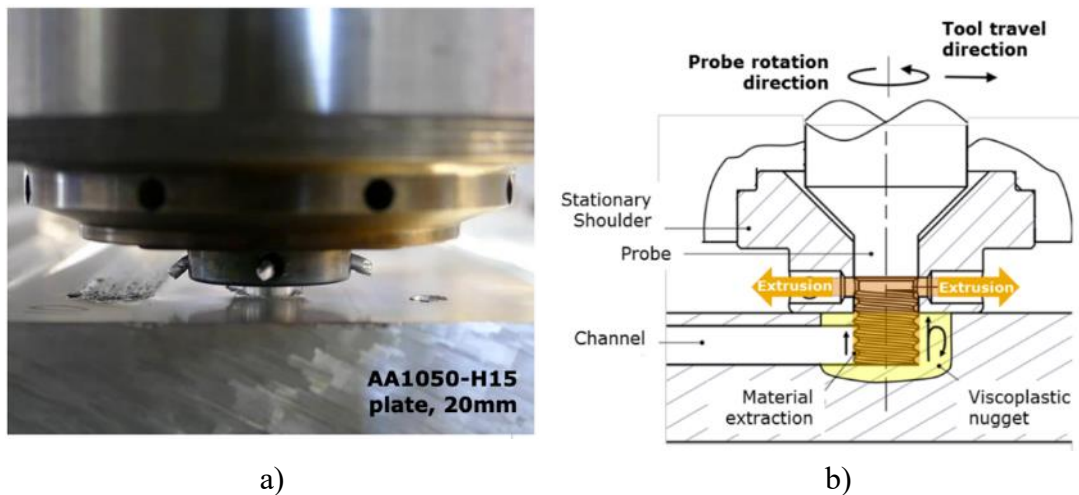


Figura 2-6 - Variante *FSC with stationary shoulder* a) imagem do processo, b) esquema explicativo do processo [32].

2.2.6 Hybrid FSC

A última das técnicas a ser patenteada, *Hybrid FSC*, junta dois processos em apenas um. Este processo foi patenteado por Vilaça *et al.* em 2019 tratando-se de uma nova vertente baseada nas *Friction Stir Based Technologies* que visa realizar canais ao mesmo tempo que realiza um cordão de soldadura entre dois materiais através de um pino não consumível em rotação [12], [13].

Em comparação com as técnicas anteriores, o *Hybrid* veio acrescentar valor ao poder combinar os benefícios de dois processos (FSW e FSC) num processo estável.

Com um pino adequado, Figura 2-7, promove a soldadura no estado sólido à medida que induz um escoamento ascendente do material, que devido à geometria da base da ferramenta, vai assegurar o fecho do canal [12], [13].

É possível ter diferentes juntas entre os materiais a ligar, como por exemplo juntas sobrepostas, topo a topo ou uma combinação destas duas últimas, ou ainda ter três juntas sobrepostas tal como é ilustrado na Figura 2-8.

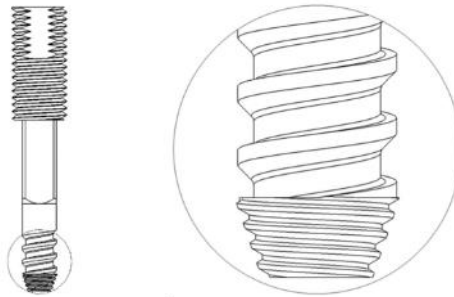


Figura 2-7 – Representação esquemática do pino utilizado no HFSC [13].

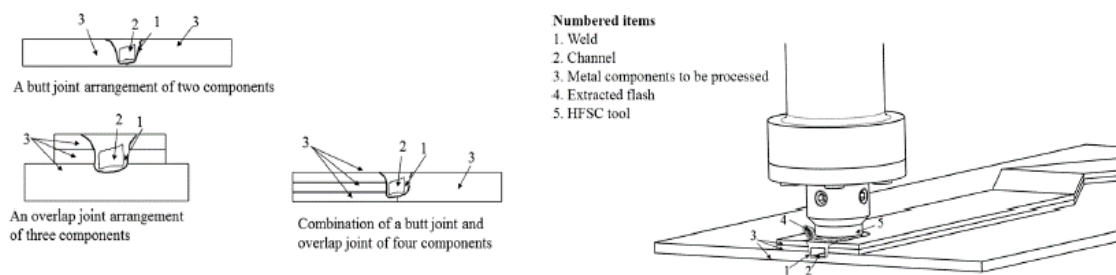


Figura 2-8 – Representação das diferentes geometria das juntas possíveis na variante HFSC, adaptado de [12].

Em 2018 foi publicado o primeiro artigo desta variante [12], realizado por Karvinen *et al.* Neste estudou-se a aplicação da técnica HFSC para melhorar a eficiência da refrigeração de componentes eletrónicos. Verificou-se a possibilidade de produzir canais de dimensões consideráveis e trajetórias complexas ao mesmo tempo que se solda duas peças sobrepostas. Comparou-se ainda esta técnica com a fresagem, sublinhando o facto de conseguir produzir canais com maior rugosidade e ter melhores taxas de arrefecimento.

2.2.7 Comparação entre Diferentes Técnicas

As quatro variantes existentes têm as suas vantagens e desvantagens, não permitindo à partida dizer qual delas é a melhor ou a pior, fazendo com que isso dependa de outros fatores como o custo de equipamentos e de material, tempo de processamento, ou ainda o facto de o acabamento superficial ser ou não fundamental.

Verifica-se que de todas as técnicas, o FSC *with shoulder-workpiece clearance* é a que tem um pior acabamento superficial, devido essencialmente à sobre espessura deixada pela não remoção de material, enquanto as restantes permitem um melhor acabamento devido à remoção deste, ou seja, a peça final fica com a mesma cota da inicial. Em oposição às restantes, o HFSC necessita de dois componentes (que podem ser de materiais diferentes), para que seja possível realizar tanto o FSC como o FSW, como foi descrito anteriormente.

Importa ainda referir que estas técnicas têm diversas características em comum. Tratam-se de técnicas limpas, que não emitem fumos nocivos ou radiação, não requerem consumíveis ou outros agentes químicos que são necessários noutras tecnologias semelhantes a esta. Os canais e a soldadura (na vertente HFSC) levada a cabo por estes métodos podem ter trajetórias não lineares. Os canais criados possuem faces internas com acabamento irregular, o que gera escoamentos turbulentos de fluidos, que por sua vez, melhora o desempenho da transferência de calor entre estes e o material no momento do arrefecimento ou aquecimento, característica útil para uma das principais aplicações industriais destas técnicas, como será explicado mais à frente.

2.3 Aplicações Industriais

O FSC é uma técnica recente, no entanto já se percebe que pode mudar algumas indústrias, como as indústrias dos moldes e dos permutadores de calor [4]. Este processo permite uniformizar as trocas de calor do fluido para o material de base e vice-versa. Isto pode, por exemplo, reduzir de forma considerável os ciclos de arrefecimento e de aquecimento dos moldes, e assim conseguir aumentar a cadência de produção. Como será referido em seguida, estes processos têm as suas vantagens e desvantagens, mas os ganhos de tempo relativos à utilização destas técnicas podem facilmente compensar algum custo extra na fabricação dos moldes ou permutadores.

Recentemente tem sido discutida a possibilidade de implementar esta tecnologia noutras indústrias, como por exemplo a indústria aeronáutica e aeroespacial, o que vem alavancar ainda mais o desenvolvimento desta tecnologia.

2.4 Processos Concorrentes

2.4.1 Furação

A furação é uma tecnologia vastamente utilizada na área da tecnologia de produção. Faz-se uso de uma ferramenta rotativa, normalmente uma broca, que é dotada de um movimento de rotação combinado com um movimento de avanço, Figura 2-9.

Trata-se da tecnologia principal no que toca à abertura de furos em peças metálicas, devido ao seu baixo custo, simplicidade e alta produtividade. Porém, a furação é limitada a apenas furos direitos, enquanto que o FSC permite obter trajetórias de canais não lineares. Outra característica que os distingue é o facto de na tecnologia FSC ser possível variar a geometria do canal ao longo da trajetória do pino através da alteração de parâmetros do processo tais como a velocidade de avanço e a velocidade de rotação da ferramenta [33].

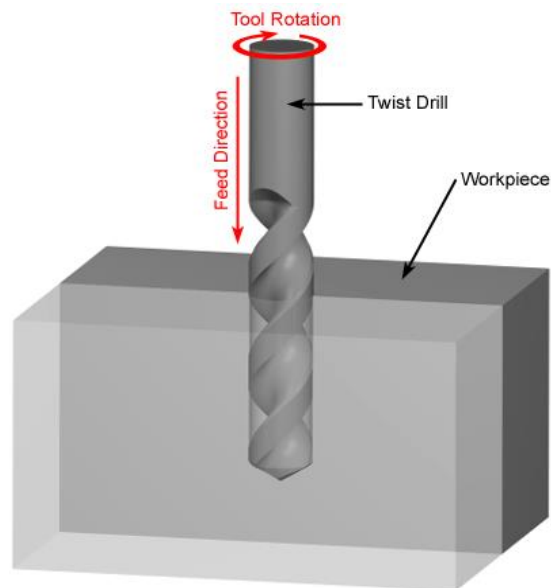


Figura 2-9 – Ilustração explicativa do processo de Furação [34].

2.4.2 EDM (Maquinação por Descarga Elétrica)

O processo EDM realiza-se através de um meio dielétrico e de um fio que se comporta como eléctrodo. Este processo consiste na criação de pequenas faíscas geradas pelo campo eléctrico, ou seja, quando o fio se aproxima da peça é gerado um arco eléctrico que por sua vez remove o material de base, sendo assim possível proceder à criação de canais e furos [35]–[39], Figura 2-10.

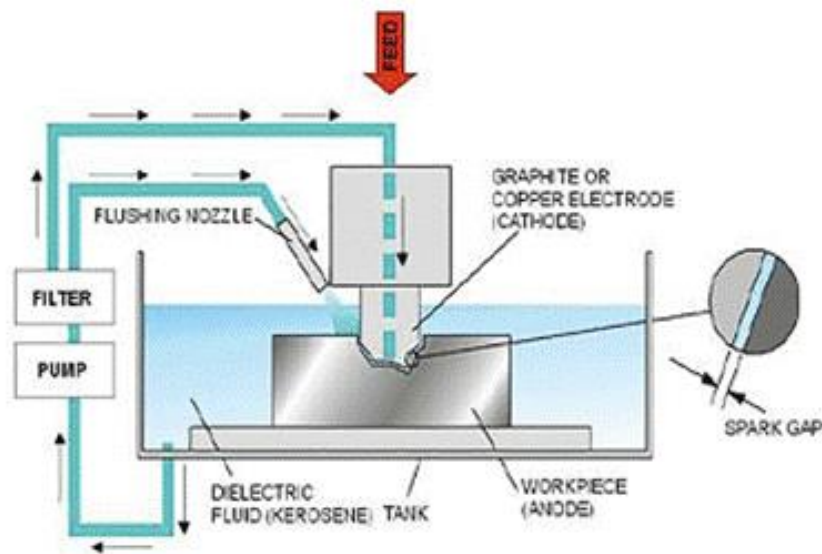


Figura 2-10- Esquema explicativo do processo EDM [39].

2.4.3 Fresagem

A Fresagem é um processo de remoção de material na qual se usa uma ferramenta rotativa com diversos gumes cortantes, Figura 2-11. Esta começou a ser utilizada na primeira década do século XX, no entanto, foi a partir dos anos 60 e até aos dias de hoje que as fresadoras de 5 eixos programadas em CNC deram o seu maior contributo à indústria, ocupando neste momento parte importante em muitas delas [40].

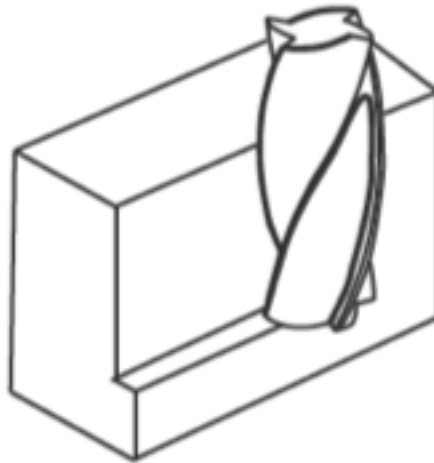


Figura 2-11 –Ilustração esquemática do processo de Fresagem [40].

Este processo é utilizado para diversas aplicações, desde maquinação simples de peças, acabamentos superficiais, maquinação de peças complexas a canais em peças maciças. Este em oposição às restantes técnicas, produz um canal aberto. No entanto, para algumas aplicações, esta técnica pode substituir ou ser substituída por uma das variantes do FSC.

2.4.4 Vantagens e Desvantagens do FSC

Como se percebe o FSC é diferente de todas as técnicas que podem concorrer com esta, logo, convém estruturar uma comparação entre estas, para que seja mais fácil identificar as vantagens e desvantagens de cada uma, com o intuito de se conseguir entender qual a melhor solução para cada situação.

O FSC tal como a fresagem permite ajustar o canal à trajetória pretendida, isto leva a que, por exemplo, o arrefecimento de um molde seja mais uniforme. Os canais de arrefecimento produzidos por FSC, por exemplo, são capazes de acompanhar a geometria do componente a produzir (*conformal cooling system*) o que contribui para uma melhor eficiência do sistema de arrefecimento. O EDM e a furação não permitem esse acompanhar da geometria o que, por sua vez, pode ser considerado uma desvantagem para estes.

O FSC gera canais de geometria irregular, o que pode ser considerado uma vantagem ou uma desvantagem, dependendo da utilização. Como referido anteriormente no FSC *with shoulder-workpiece clearance* a superfície obtida tem uma

sobre espessura o que, por sua vez, pode ser uma desvantagem. Todas as técnicas têm as suas limitações em relação ao comprimento do canal.

Pode concluir-se que no seu conjunto, as técnicas têm as suas vantagens e desvantagens, mas todas elas têm as suas aplicações, ou seja, nenhuma destas pode substituir-se às restantes por completo. A Tabela 2 1 sintetiza as vantagens e desvantagens das diferentes tecnologias.

Tabela 2-1 - Comparação entre o FSC e técnicas concorrentes (de menor, - -, para maior, ++).

Características		FSC	Furação	EDM	Fresagem
Canal	Abertura	Fechado	Fechado	Fechado/ Aberto	Aberto
	Direção	Ajustável	Linear	Linear/ Ajustável	Ajustável
	Geometria	Irregular	Regular	Regular	Regular
Complexidade da técnica		++	- -	+	-
Tempo de processamento		+	- -	++	-

Capítulo 3

Nesta dissertação realizaram-se diversos processamentos por FSC tendo sido utilizadas duas ligas distintas e duas bases, também elas diferentes para evidenciar a influência destas no processo. Neste capítulo serão apresentadas as metodologias utilizadas para os ensaios, testes e estudos realizados, juntamente com informações relevantes sobre as ligas e bases escolhidas.

3 Metodologia Experimental

3.1 Materiais

Nesta tese optou-se pela utilização de duas ligas de alumínio distintas (AA5083-H111 e AA2017-T451) e duas bases de material diferente (Baquelite e outra de Aço CK45). No presente subcapítulo será realizada uma breve síntese acerca das propriedades destes materiais. Optou-se por estes materiais para as bases por apresentarem propriedades de transferência de calor díspares e assim poder-se avaliar de forma evidente a importância desta no processo. Relativamente aos materiais escolhidos para as chapas a processar, selecionou-se duas ligas utilizadas na indústria, uma tratada termicamente (AA2017-T451) e outra endurecida mecanicamente (AA5083-H111). Posto isto, pode-se também avaliar a diferença dos materiais selecionadas no processamento por FSC.

3.1.1 Ligas de alumínio

As propriedades das duas ligas referidas anteriormente (AA5083-H111 e AA2017-T451) são apresentadas nas Tabela 3-1 e Tabela 3-2.

Tabela 3-1 - Propriedades das ligas de alumínio [41], [42].

	Temperatura de fusão [°C]	Condutividade térmica [W/m.K]	Densidade [g/cm ³]	Tensão de cedência [MPa]	Tensão de rotura [MPa]
AA5083-H111	570	121	2,65	145	300
AA2017-T451	513-640	134	2,8	275	427

Tabela 3-2 - Continuação da Tabela 3-1-Propriedades das ligas de alumínio [41], [42].

	Alongamento [%]	Módulo de elasticidade [GPa]	Poisson	Módulo de distorção [GPa]	Tensão de corte [MPa]
AA5083-H111	23	72	0,33	26,9	175
AA2017-T451	22	72,4	0,33	27,5	262

3.1.2 Bases

As bases escolhidas têm como principal diferença a sua condutividade térmica, sendo que o Aço CK45 e a Baquelite têm 15,1 W/m.K e 0,2 W/m.K, respetivamente. Nestas bases é evidente o contraste de condutividade térmica, logo, espera-se encontrar diferenças nos ensaios realizados. Esta divergência deverá influenciar a temperatura do processo, o que pode levar a uma fácil remoção do material ou, pelo contrário, dificultá-la.

3.2 Produção de Canais por Fricção Linear

Neste estudo optou-se por não utilizar nenhuma das variantes anteriormente enunciadas, mas sim uma mistura de duas, sendo estas o MFSC e o FSC *without shoulder-workpiece clearance*, ou seja, um pino com rosca e uma base da ferramenta estriada, mas com um ângulo de ataque aplicado à ferramenta.

O processamento por FSC é complexo mas também o equipamento e método de controlo utilizados têm influência nos resultados obtidos, ou seja, o comportamento desta tecnologia é diferente dependendo do controlo utilizado (força ou posição) [43]. Por esta razão realizou-se um conjunto de ensaios preliminares com o intuito de se atingir a otimização de parâmetros. O HII (*Heat Input Index*) [rev.mm⁻¹], Equação (3-1), influenciou as tomadas de decisão relativas aos ajustes de parâmetros, Onde ω é a velocidade de rotação [rev.min⁻¹] e v é a velocidade de avanço [mm.min⁻¹]

$$HII = \frac{\omega}{v} \quad (3-1)$$

Nas Tabela 3-3 e Tabela 3-4 são identificados os ensaios realizados e definidos os parâmetros utilizados para as ligas AA5083-H111 e AA2017-T451, respetivamente. Todos os ensaios foram realizados com um ângulo de ataque igual a 1,5°. O comprimento de pino (desde a estria, h_p) variou com a liga devido às diferenças de espessura das chapas, para a liga AA5083-H111 $h_p = 6,7$ mm e para a liga AA2017-T451 $h_p = 5,5$ mm (nos ensaios, A5_56_1120, A5_56_900 e A5_71_900.1 $h_p = 6$ mm e nos ensaios A5_71_900.2, A5_45_900 e A5_45_560 $h_p = 7,8$ mm).

Tabela 3-3 - Identificação dos ensaios realizados na Liga AA5083-H111 (chapas com 10 mm de espessura).

Identificação do ensaio	Base	v [mm.min ⁻¹]	ω [rev.min ⁻¹]	HII [rev.mm ⁻¹]
A5_56_1120	Aço	56	1120	20
A5_56_900		56	900	16
A5_71_900.1		71	900	13
A5_71_900.2				
A5_45_900		45	900	20
A5_45_560		45	560	12
A5_71_560		71	560	8
A5_71_450.1		71	450	6
A5_71_450.2				
A5_71_450.3				
A5_71_450.4				
B5_71_450.1	Baquelite	71	450	6
B5_71_450.2				
B5_71_450.3				
B5_90_450		90	450	5
B5_140_450.1		140	450	3
B5_140_450.2				

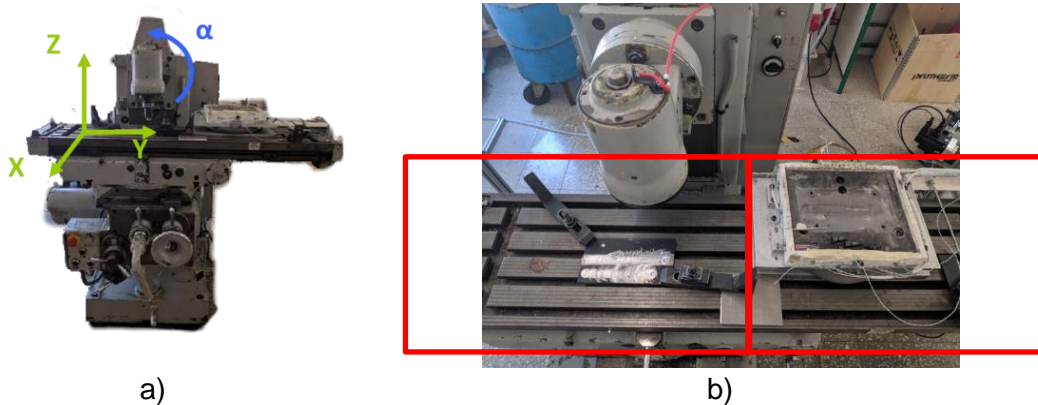
Tabela 3-4 - Identificação dos ensaios realizados na Liga AA2017-T451 (chapas com 8 mm de espessura).

Identificação do ensaio	Base	v [mm.min ⁻¹]	ω [rev.min ⁻¹]	HII [rev.mm ⁻¹]
A2_71_450	Aço	71	450	6
A2_112_450		112	450	4
A2_180_450		180	450	2,5
A2_180_355		180	355	2
A2_180_280		180	280	1,5
A2_180_900		180	900	5
A2_112_900		112	900	8
A2_71_900		71	900	13
A2_71_710		71	710	10
A2_112_710		112	710	6
A2_180_710		180	710	4
B2_71_900	Baquelite	71	900	13
B2_112_900		112	900	8
B2_112_1120		122	1120	9
B2_71_1120		71	1120	16

Nestes ensaios procurou-se estabelecer a janela de parâmetros ideais para cada liga em cada uma das bases utilizadas.

3.2.1 Equipamento

Os ensaios de FSC foram realizados numa fresadora universal, Figura 3-1 a), com controlo de posição segundo o eixo Z. A mesa da fresadora tem 1100 mm e 315 mm, respetivamente sobre o eixo X e Y. No entanto, esta está dividida em duas zonas, Figura 3-1 b). A primeira com uma base de aço completamente instrumentada (600 mm, segundo o eixo X) e com capacidade para medir, tanto a temperatura da base, como os momentos aplicados no processo; e a segunda (com os restantes 500 mm) com a mesa em aço e onde se pode colocar outras bases (como por exemplo a de baquelite utilizada, ou a de cobre projetada).



a) b)
Figura 3-1 - a) Fresadora universal com controlo de posição nos três eixos e possibilidade de aplicação de um ângulo de ataque. b) Mesa da fresadora com identificação das zonas de trabalho.



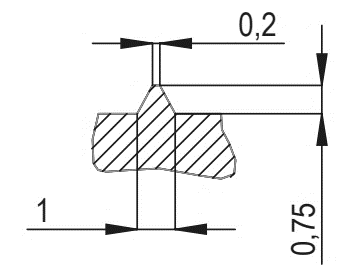
3.2.2 Ferramenta

A ferramenta utilizada é composta por 3 elementos (corpo, base da ferramenta/*shoulder* e pino) e 4 parafusos, 3 de fixação e 1 de encosto (para garantir o comprimento do pino), Figura 3-2. A geometria do *shoulder* e do pino têm uma grande importância para o bom resultado do processamento e podem fazer variar os resultados obtidos, assim sendo, optou-se por utilizar a mesma geometria tanto da base da ferramenta (J) como do pino (F), Tabela 3-5, tanto para os ensaios na base de aço como na base de baquelite.



Figura 3-2 - Ferramenta utilizada para a produção dos canais.

Tabela 3-5 - Geometrias da ferramenta utilizada e os seus componentes.

Base da Ferramenta	Pino	Estria
		
D = 19 mm	Rosca M8	

3.2.3 Sistema de fixação

Foram utilizados dois sistemas de fixação, o primeiro, Figura 3-3 a), para fixar a chapa processada à base de aço instrumentada (temperatura e binário). O segundo, Figura 3-3 b), serviu para fixar tanto a base de baquelite como as chapas processadas, neste recorreu-se à utilização de grampos. Estes sistemas de fixação foram usados separadamente, dependendo do ensaio que era realizado.

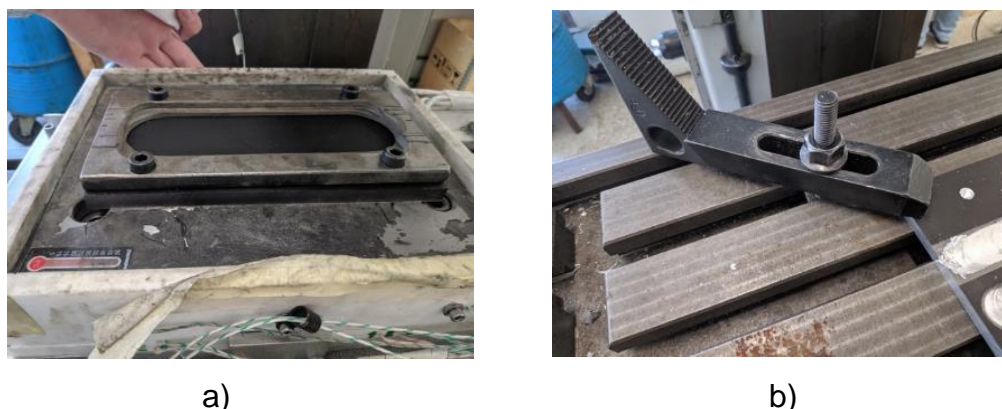


Figura 3-3 - Sistemas de fixação: a) de chapas à base de aço CK45 instrumentada b) de chapas à base de aço CK45 não instrumentada e para a base de baquelite e as chapas nela processadas.

3.2.4 Medições realizadas durante os ensaios

Durante estes ensaios recolheram-se dados relativos à temperatura do processo e momentos aplicados (estes valores permitiram calcular a eficiência energética do processo, como se encontra explicado na secção 4.8). Os dados de temperatura foram recolhidos através de termopares (23 na base de aço CK45 instrumentada e 2 nas restantes, aço CK45 e Baquelite), uns do tipo K e outros do tipo N e de uma câmara/sensor termográfico *Fluke Ti400 IR FUSION TECHNOLOGY*. Estes dados serão explicados e tratados nas secções 3.8 e 4.8, respetivamente.

Ao se utilizar as bases não instrumentadas, instalou-se um par de termopares, colocados entre a base e a chapa e situados a meio desta, um do lado em avanço e outro do lado em retrocesso, Figura 3-4.

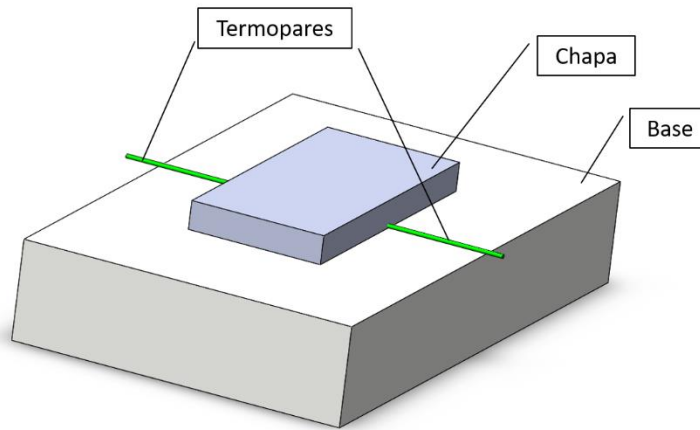


Figura 3-4 – Representação esquemática da posição dos termopares.

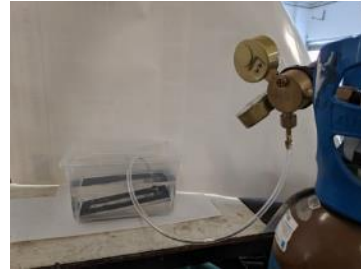
3.3 Ensaio de Estanquicidade

Existem diversas formas de avaliar a estanquicidade de um canal. Nesta dissertação optou-se por mergulhar a peça/chapa processada dentro de água, introduzindo em simultâneo no canal um gás de elevada capilaridade (hélio). Assim sendo, caso exista algum defeito entre o canal e a superfície, será revelado na forma de bolhas de hélio, Figura 3-5 a). Para a realização destes ensaios foram desenvolvidos os meios laboratoriais necessários.

Optou-se por realizar a ligação ao canal através do local de saída do pino, Figura 3-5, uma vez que a relação das dimensões do canal e da chapa tornaram impossível adaptar com sucesso um outro aparato experimental, como é possível ver na Figura 3-6. Como se percebe por esta figura, o diâmetro, D , teria obrigatoriamente que ser superior a 8 mm mas inferior a 10 mm, no entanto, era inviável esta implementação.



a)



b)

Figura 3-5 – a) Canal não estanque durante o ensaio de estanquicidade
b) Aparato experimental do ensaio de estanquicidade.

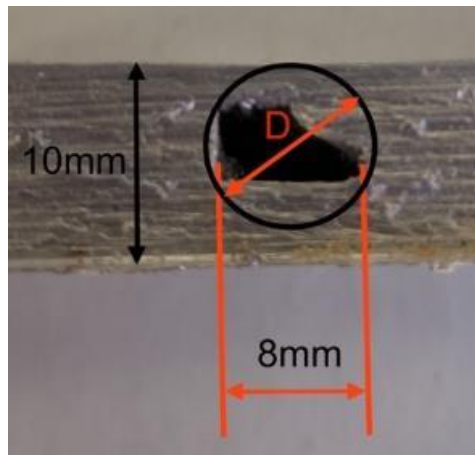


Figura 3-6 – Relação do tamanho do canal vs tamanho da chapa (AA5083-H111).

3.4 Caracterização Metalográfica dos Canais

Após a realização dos ensaios seccionou-se parte dos canais produzidos para a realização da caracterização metalográfica dos mesmos. A preparação das amostras realizou-se com o auxílio de uma resina (embutimento a frio), tapando-se as entradas dos canais. Estas amostras foram polidas e contrastadas com uma variante do *Keller's Reagent*, como se pode observar na Tabela 3-6. Após a contrastação das amostras, estas foram observadas no microscópio ótico, *Leica DMI 5000 M*. Com esta observação verificou-se a existência de diferenças no tamanho de grão das zonas (ZTMA, ZTA, *nugget* e material de base), tal como possíveis fraturas, vazios ou irregularidades nos canais (análise micrográfica). As macrografias obtidas foram utilizadas para caracterizar as dimensões dos canais.

Tabela 3-6 – Reagente utilizado para contrastar as ligas AA5083-H111 e AA2017-T451.

<i>Variante do Keller's Reagent</i>				
Composição Química	2 ml HF (48%)	3 ml HCl (37%)	20 ml HNO ₃ (65%)	175 ml Água
Tempo de ataque	Submergir durante 10 segundos e em seguida secar a amostra. No caso de não estar atacada deve repetir-se este procedimento o número de vezes necessárias, mas com um período de duração de 3 segundos.			

As amostras foram cortadas utilizando uma serra de corte com refrigeração, *GBS-218 ECO Autocut*, sendo posteriormente polidas usando uma polidora giratória *Buehler Phoenix Alfa*, com o auxílio de diversas lixas de água, desde a lixa P80 até à lixa P4000 (em 8 passos), no seguimento destas, utilizou-se um disco de pano com uma solução abrasiva de Alumina para que a superfície ficasse sem riscos e espelhada, pronta para o ataque químico.

3.5 Rugosidade Interna

A rugosidade interna dos canais foi medida utilizando um rugosímetro, *Marsurf PS10*, no entanto para acedermos ao interior do canal teve de se recorrer a um disco de precisão para seccionar parte do canal como mostra a Figura 3-7, assim, temos acesso aos quatro lados do canal: topo, lado em avanço, base e lado em retrocesso. No entanto, devido quer à inclinação do lado em retrocesso, quer à excessiva rugosidade do topo do canal, não foi possível determinar a rugosidade dos mesmos. A Figura 3-8 ilustra a diferença de rugosidades entre estas (lado em retrocesso e topo) e as restantes superfícies do canal (base e lado em avanço).

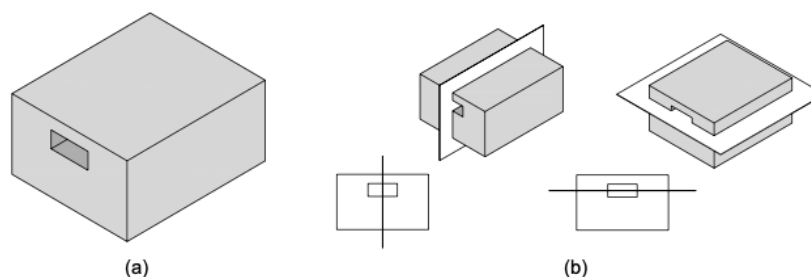


Figura 3-7 - a) Canal antes de seccionar para testes de rugosidade b) Esquema de corte das amostras [2].

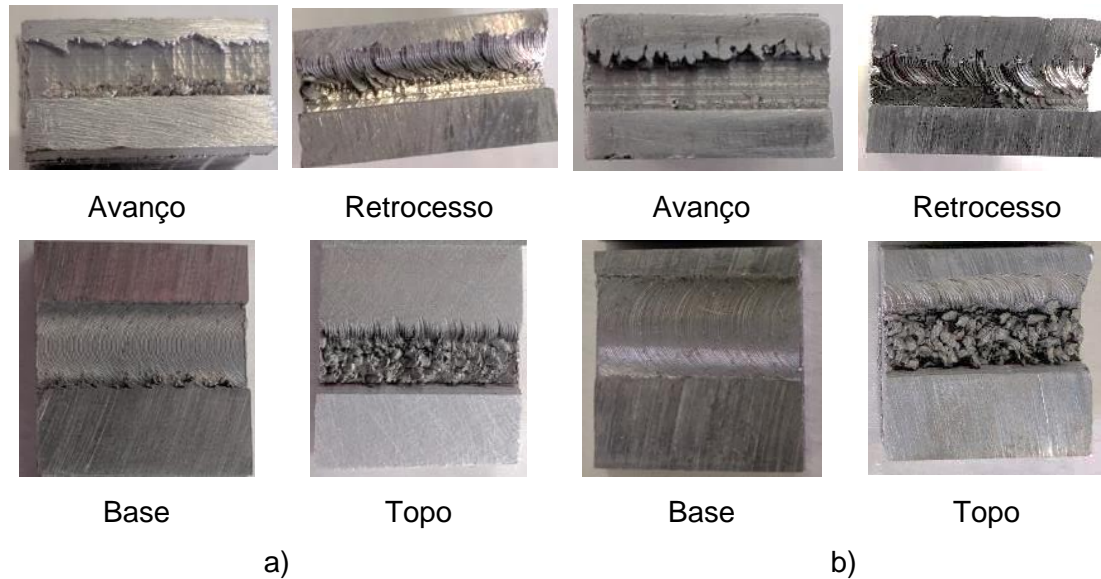


Figura 3-8 - Comparação da rugosidade das paredes de canais produzidos na liga AA5083-H111 a) A5_71_450 b) B5_71_450.

Na secção 4.4 apresenta-se as rugosidades média (R_a) e máxima (R_{max}), Tabela 4-1. As primeiras (R_a) foram calculadas pela média de três ensaios, enquanto as segundas (R_{max}) foram calculadas pelo máximo de três ensaios.

3.6 Inspeção por Correntes Induzidas

Estes ensaios tiveram como principal objetivo, a identificação de defeitos/vazios ou alterações na microestrutura através da indução de correntes na peça utilizando uma sonda de correntes induzidas para esse efeito. Estes defeitos ou alterações podem ser identificados através de alterações no campo magnético gerado pelas correntes induzidas. Quando estas correntes se deparam com defeitos ou alterações estruturais da peça terão uma maior dificuldade em circular, criando assim perturbações no campo magnético por elas gerado que podem ser identificadas e medidas pela sonda.

No entanto, dependendo de parâmetros como a condutividade elétrica do material ou a frequência das correntes induzidas, a penetração destas na peça varia, permitindo assim identificar outras zonas, isto é, os defeitos ou alterações identificados num ensaio podem não se refletir noutro, basta apenas que estes defeitos ou alterações não sejam visíveis para aquela gama de frequências. Para colmatar este facto foram utilizadas três sondas (com gamas de frequências diferentes) a diferentes frequências, como se pode observar na Tabela 3-7 e na Tabela 3-8.

Tabela 3-7 – Informações das sondas utilizadas (*Olympos*).

Gama de frequências ótimas	Frequência utilizada [kHz]	Identificação
50 kHz-500 kHz	50	S1
1 MHz-6 MHz	4700	S2
	8700	S3
500 kHz-1 MHz	750	S4

Tabela 3-8 - Penetração de uma percentagem de correntes induzidas em função da sonda.

Identificação	63%	99%
S1	<0,51 mm	<2,33 mm
S2	<0,05 mm	<0,24 mm
S3	<0,04 mm	<0,19 mm
S4	<0,14 mm	<0,64 mm

A profundidade de penetração (δ) [mm] das correntes induzidas foi calculada utilizando a Equação (3-2), em que: f é a frequência utilizada [Hz], $\sigma_{\%}$ condutividade elétrica e μ_r a permeabilidade magnética relativa.

$$\delta = \frac{661}{\sqrt{f \cdot \sigma_{\%} \cdot \mu_r}} \quad (3-2)$$

Como referido anteriormente, esta técnica de inspeção não destrutiva permite avaliar (no plano complexo) três características da peça inspecionada, sendo estas vazios/falta de material, condutividade elétrica e a permeabilidade magnética. Nestes ensaios não se esperava a variação desta última, por se tratar de materiais que não são ferromagnéticos. Cada uma destas expressa-se essencialmente sobre um eixo, real ou imaginário, como representado na Figura 3-9. Posto isto, pode-se calibrar a sonda para que leia sobre um desses eixos, no entanto como estes não têm que ser perpendiculares entre si, as componentes relativas às restantes características poder-se-ão fazer notar, camuflando assim os resultados experimentais. Como para os alumínio não existem

variações da permeabilidade magnética, apenas os vazios e as variações de condutividade elétrica serão relevantes. Nesse caso, calibrou-se a sonda para ler o eixo relativo à condutividade no eixo real, Figura 3-10.

Desta forma, e observando as variações medidas no eixo real consegue-se maximizar a leitura das variações da condutividade sendo, no entanto, de notar que estas podem conter uma parcela/componente do eixo relativo à falta de material. Porém, no eixo imaginário consegue-se inferir as variações existentes quase em exclusivo devido à falta de material.

Todas as amostras foram previamente fresadas para obter uma superfície plana, assim a sonda consegue deslizar sobre a peça sem encontrar discontinuidades.

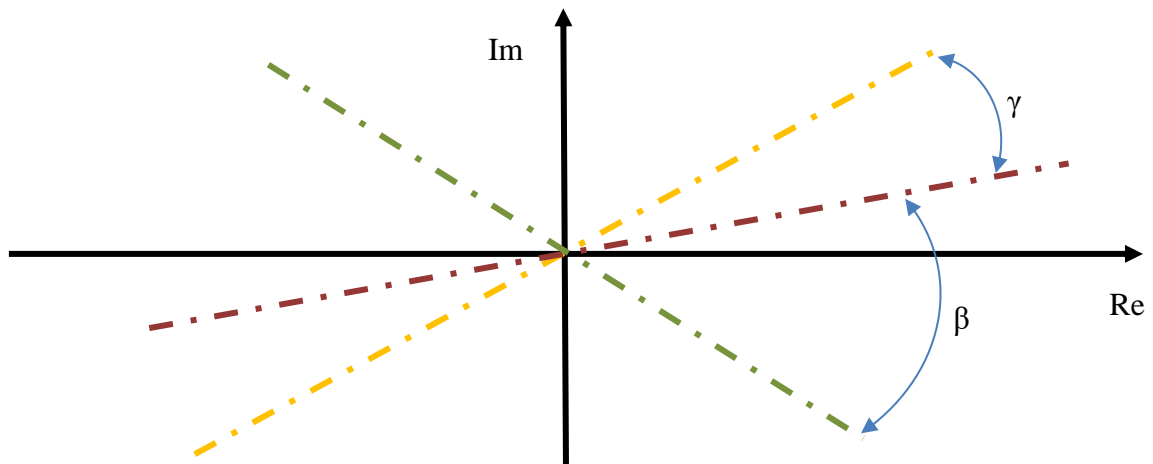


Figura 3-9 - Plano complexo, com representação dos eixos preferenciais para cada uma das características.

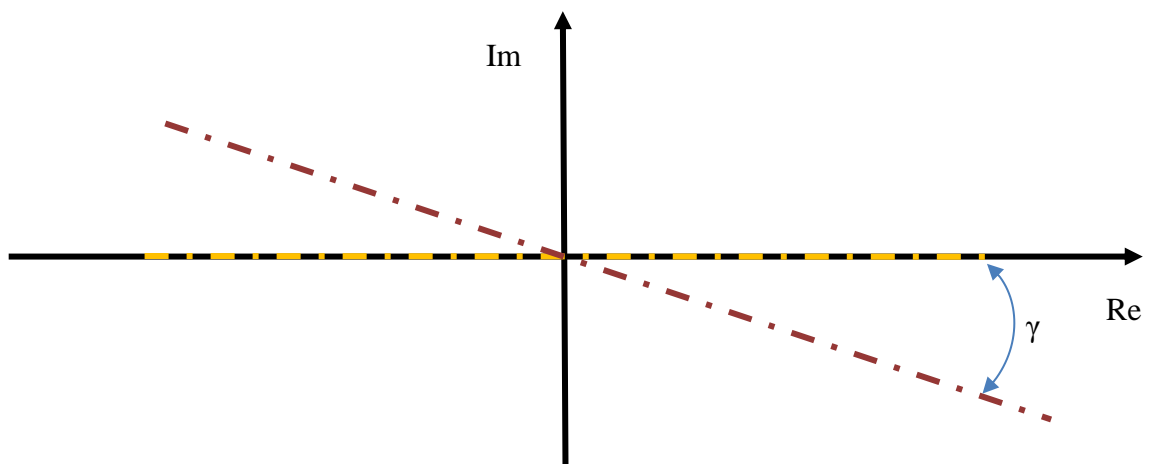


Figura 3-10 - Plano complexo, calibrado para ler variações na condutividade elétrica no eixo real.

3.7 Ensaios de Dureza

As medições de dureza de Vickers foram realizadas utilizando um equipamento de medição de dureza, *Mitutoyo HM_112 Micro-Vickers*, segundo a norma ISO Standard 6507-1:2018.

Realizaram-se diversas indentações (0,3 Kgf durante 10 s) ao longo de uma linha (espaçadas por 0,5 mm) e a uma profundidade de 0,6 mm, Figura 3-11. Esta profundidade está de acordo com os valores alcançados pelas correntes induzidas relativas à sonda S1 para que possam ser comparados os dois resultados (dureza com uma variável proporcional à condutividade elétrica, obtida nas correntes induzidas [44]), no entanto, observou-se que a existência do canal/vazios não permitia distinguir qualquer alteração a nível da variação da condutividade.

Assim sendo, analisaram-se os resultados (das correntes induzidas e da dureza) em separado.

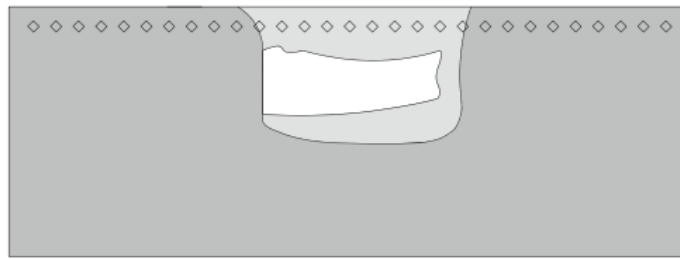


Figura 3-11 - Esquema ilustrativo do método de indenta o utilizado nos ensaios de dureza, [18].

3.8 Eficiência Energética do Processo

A eficiência energética do processo é um parâmetro importante, pois é a partir deste que se consegue perceber como é convertida a energia consumida e como se pode utilizar esta informação para melhorar o processo. Como está ilustrado na Figura 3-12 as conversões da energia elétrica em energia útil passam por diversos rendimentos e perdas para outras formas de energia (principalmente térmicas).

A energia consumida (elétrica) e a energia mecânica podem ser descritas pelas equações (3-3) e (3-4) respetivamente.

$$E_{el } = P \cdot t = U \cdot I \cdot t = R \cdot I^2 \cdot t \quad (3-3)$$

Em que P é a potência pedida pelos equipamentos, t o tempo, U a diferença de potencial da rede e I a corrente fornecida pela rede.

$$E_{mec} = \omega \cdot M + F_x \cdot v \approx \omega \cdot M \quad (3-4)$$

Em que ω é a velocidade de rotação da ferramenta, M o momento aplicado, F a força horizontal aplicada e v a velocidade de avanço da ferramenta ou da mesa de trabalho. A segunda parcela pode ser desprezada sem se incorrer num erro grave pois esta é de uma ordem de grandeza inferior à primeira. A energia perdida para o meio ambiente é também ela desprezada por essa mesma razão.

A energia térmica perdida para a ferramenta, equipamento, base e chapa podem ser calculadas através da massa destes, o aumento de temperatura desde o início até ao final do processamento, e os seus calores específicos, Equação (3-5). No entanto a energia que transferida através da ferramenta é aproximada ao calor que passa apenas para a ferramenta desprezando o calor que passa para o equipamento, pois o tempo de processamento é tão curto que o equipamento mantém a sua temperatura inalterada, ao contrário da base, da chapa e da ferramenta.

$$E_{Term} = m.c.\Delta T \quad (3-5)$$

Em que, m é a massa, c o calor específico e o ΔT a diferença de temperatura.

Foram pesadas as chapas, a base e a ferramenta e foram anotadas as suas temperaturas iniciais e finais. Registou-se através de uma célula de carga os momentos aplicados no processo, com estes calculou-se a energia mecânica fornecida. Realizando a diferença entre estas energias podemos obter a energia necessária para a deformação mecânica.

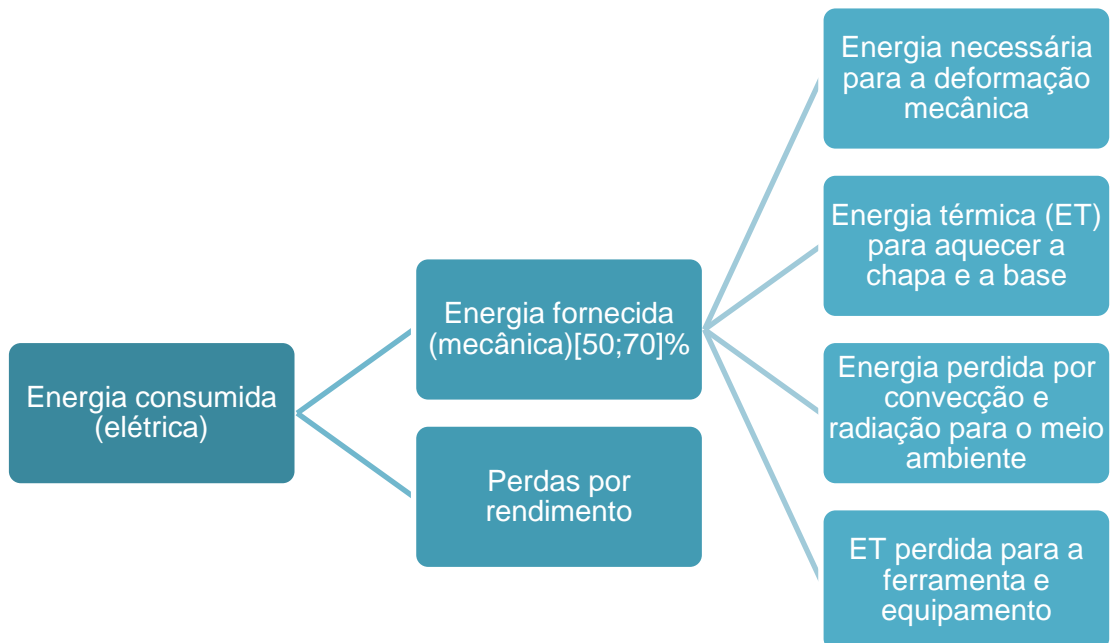


Figura 3-12 - Metodologia utilizada para o cálculo da eficiência energética.

Capítulo 4

Neste capítulo são apresentados e discutidos os resultados dos ensaios de *Friction stir channelling*, estanquicidade e dureza, bem como a caracterização metalográfica e morfológica dos canais. Os resultados das inspeções com correntes induzidas e a eficiência energética do processo são igualmente abordados.

4 Resultados Experimentais

4.1 Produção de Canais por Fricção Linear

Neste estudo avaliou-se a influência da base na janela de parâmetros. Na Figura 4-1 e Figura 4-2 pode observar-se o que aconteceu a estas para cada uma das ligas. Nestas pode concluir-se que as janelas de parâmetros se deslocam, pois as especificações utilizadas nos ensaios de resultado ótimo para a base de aço não correspondem a parâmetros adequados para a base de baquelite. Para esta base foi impossível determinar uma janela que se possa considerar útil, com a qual se pode obter canais ótimos pois as condições para a criação dos canais nunca se mantêm constantes. Ou seja, a janela de parâmetros varia ao longo do tempo devido ao aumento de temperatura do processo, potencializado pela maior resistência térmica inerente à baquelite.

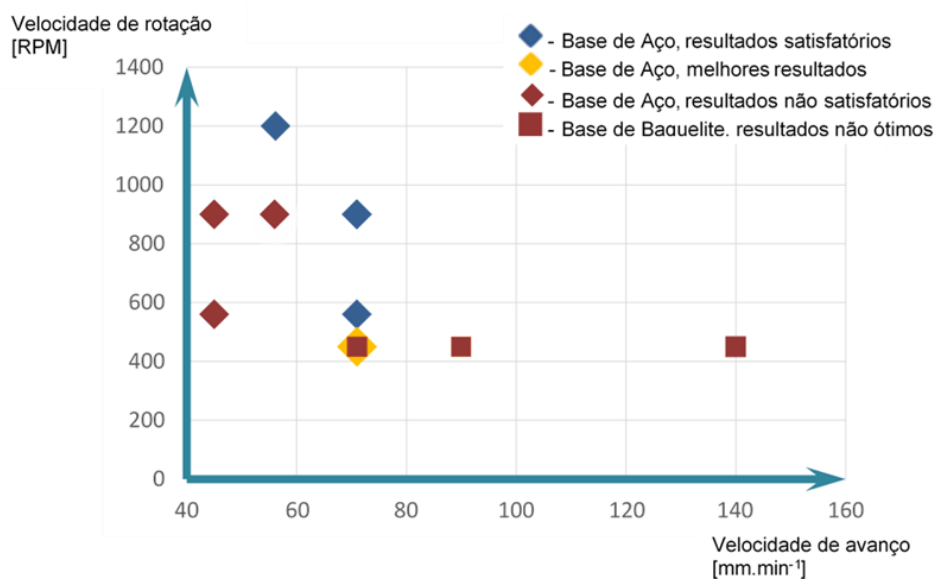


Figura 4-1 – Janela de parâmetros dos ensaios realizados para a Liga AA5083-H111.

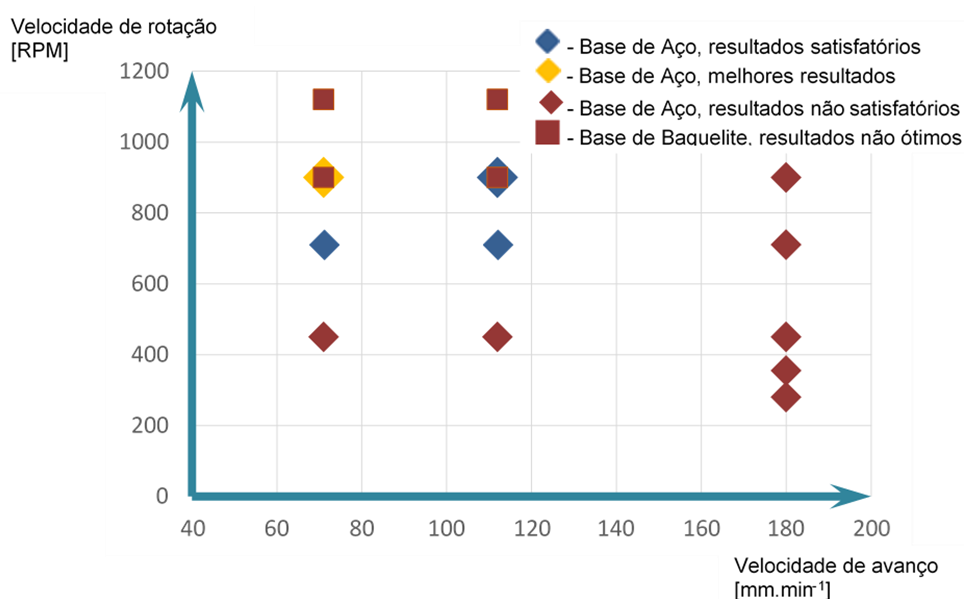
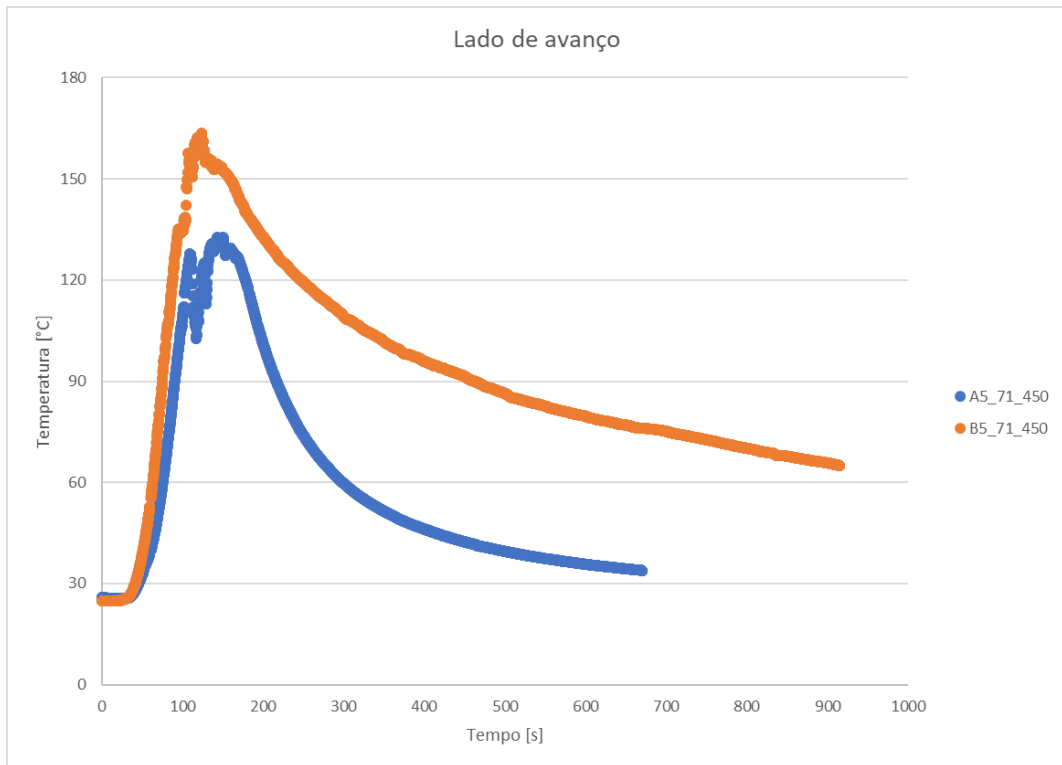
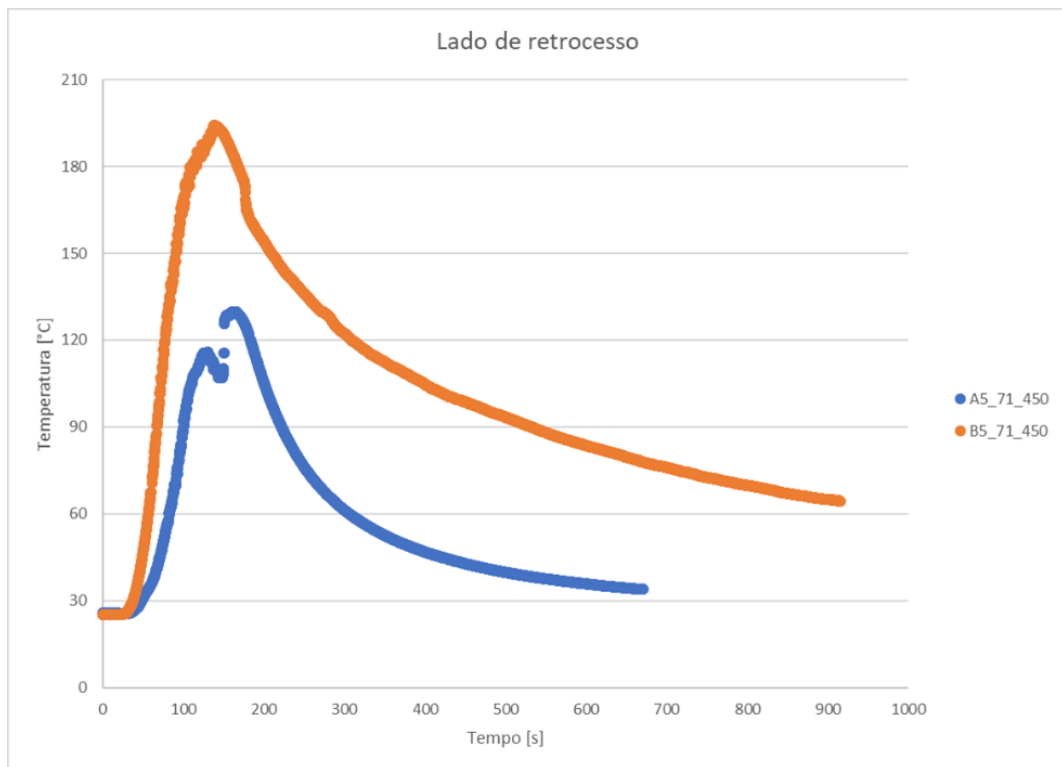


Figura 4-2 - Janela de parâmetros dos ensaios realizados para a Liga AA2017-T451.

De modo a avaliar as diferenças entre utilizar cada uma das bases, monitorizou-se o campo de temperaturas através de dois métodos diferentes, como referido na secção 3.2.4. Por intermédio da Figura 4-3 percebe-se que, para as mesmas condições, o processo torna-se mais quente quando se utiliza a base de baquelite, tornando assim impossível estabilizar o processo (as condições de produção do canal não são constantes). O processo não é estacionário.



a)



b)

Figura 4-3 – Representação gráfica da evolução da temperatura do processo (medida entre a chapa e a base) a) no lado em avanço e b) no lado em retrocesso.

No entanto, os dados apresentados na Figura 4-3 são representativos apenas da evolução e não dos valores atingidos no local da produção do canal. Consequentemente usou-se uma câmara termográfica para identificar um valor mais próximo desta zona. Por meio destes resultados pode-se concluir que as temperaturas são superiores às obtidas através dos termopares. Por exemplo, num dos ensaios realizados, A5_71_450, a temperatura estabilizou próxima dos 240 °C, Figura 4-4. Acredita-se que este valor possa ser mais elevado pois a câmara termográfica não permite medir a temperatura na zona já processada.

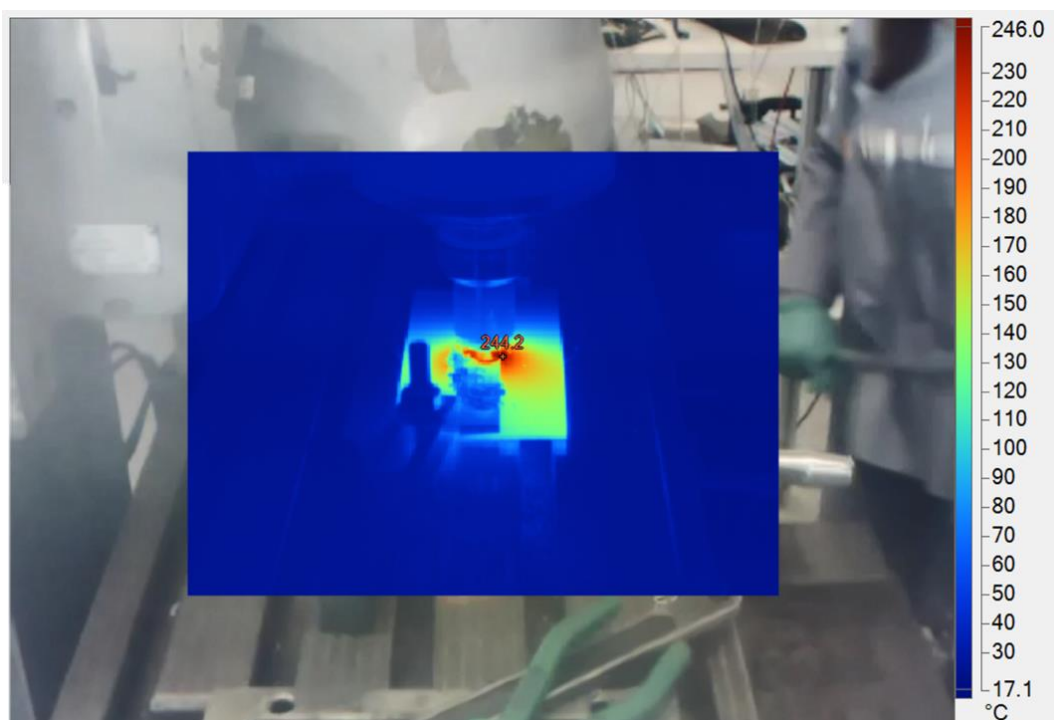


Figura 4-4 - *Frame* do ensaio A5_71_450. Representação do campo de temperaturas na superfície da chapa.

4.2 Ensaio de Estanquicidade

Os ensaios de estanquicidade permitem avaliar se o canal está estanque. Esta característica tem a sua relevância pois pode viabilizar ou inviabilizar uma aplicação industrial. Antes destes, realiza-se uma inspeção visual pois em algumas circunstâncias, como na Figura 4-5, não é necessário este ensaio para comprovar que o canal não é estanque. No entanto, mesmo nestas situações este ensaio pode ser importante para se perceber se foi possível atingir alguma zona estável no canal, ou seja, se este é parcialmente estanque. Estes canais apresentam defeitos pontuais, mas conseguiu-se atingir uma estacionariedade que permitiu produzir algumas secções perfeitamente fechadas. Este facto surgiu porque houve dificuldade em manter constantes as condições de formação dos canais. Por exemplo, a temperatura da base e da chapa aumenta ao longo do processamento, o que torna o material mais macio. Assim sendo, podemos concluir que a janela de parâmetros muda ao longo do processamento.

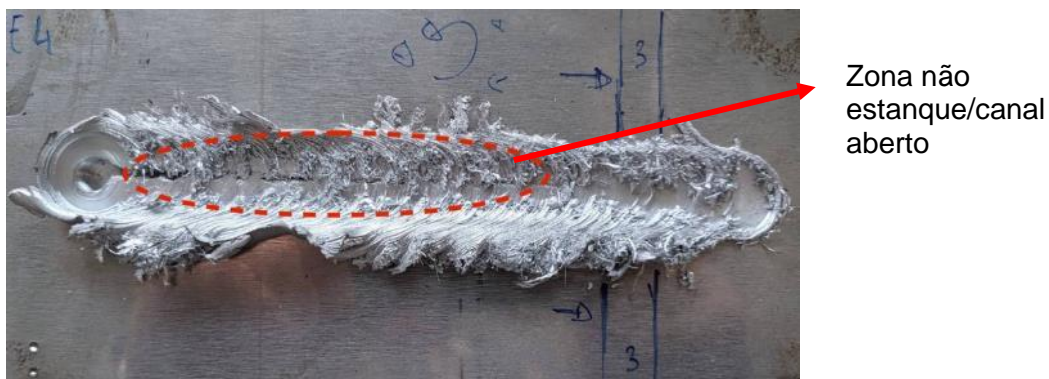


Figura 4-5 - Canal não estanque inspecionado visualmente.

Uma vez que o equipamento utilizado não permite ajustar as velocidades durante o processamento (durante o ensaio), estudou-se uma forma de manter constantes as condições de criação do canal. Na secção 5.2, encontra-se o raciocínio e o desenvolvimento para a conceção de uma base refrigerada. Deste modo espera-se conseguir controlar e estabilizar a temperatura da base e da chapa, de forma a manter as condições ideais para a produção dos canais.

4.3 Caracterização Metalográfica dos Canais

Foram analisadas diversas zonas dos canais com o objetivo de se perceber a existência de defeitos e de diferenças na microestrutura ao longo dos canais. Assim sendo, optou-se por inspecionar com maior detalhe as seguintes zonas: o *nugget*, o lado em avanço, a base, os cantos e as fronteiras entre o *nugget* e a ZTMA.

A Figura 4-6, Figura 4-7, Figura 4-8 e Figura 4-9 correspondem às macrografias dos canais produzidos nos ensaios A2_71_900, B2_71_900, A5_71_450 e B5_71_450, respetivamente.

De acordo com o material de base das ligas utilizadas (AA2017-T451 e AA5083-H111), Figura 4-10 g), Figura 4-11 h), Figura 4-12 g) e Figura 4-13 g), percebe-se que têm diferenças nas suas microestruturas, sendo que a liga AA2017-T451 tem grãos de maior dimensão. Este facto pode ocorrer devido ao tratamento térmico realizado nesta liga.

Nos processamentos de FSC é essencial obter um canal fechado, no entanto, podem surgir defeitos como os ilustrados na Figura 4-12 e), Figura 4-12 f), Figura 4-13 a), Figura 4-13 b) e Figura 4-13 c) (camadas fortemente encostadas), ao invés de completamente unidas, Figura 4-10 e), Figura 4-11 e) e Figura 4-11 f). Este fator pode, por exemplo, levar a canais não estanques ou com menor resistência a esforços internos.

Como referido na subsecção 3.2 os ensaios nas ligas AA5083-H111 e AA2017-T451 foram realizados em chapas de 10 mm e 8 mm, respetivamente. Consequentemente, os comprimentos de pino utilizados foram diferentes, para as chapas de 10 mm utilizou-se um $h_p = 6,7$ mm, enquanto que nas chapas de 8 mm utilizou-se um $h_p = 5,5$ mm. Deste modo e recorrendo à Figura 4-10 a), Figura 4-10 e), Figura 4-10 f), Figura 4-11 d), Figura 4-11 e), Figura 4-12 d), Figura 4-12 f) e Figura 4-13 f) pode identificar-se diferenças entre os processamentos das duas ligas. Nos ensaios da liga AA5083-H111 observa-se um fluxo ascendente de material enquanto nos ensaios da liga AA2017-T451 um fluxo descendente. A justificação para este acontecimento está relacionada com o comprimento do pino, quando este é maior o fluxo preponderante será ascendente, caso contrário o fluxo predominante será descendente pois nesta situação a ação do *shoulder* prevalece sobre a ação do pino.

Durante o processamento, a zona do *nugget*, Figura 4-10, Figura 4-11, Figura 4-12 e Figura 4-13, sofre uma recristalização dinâmica. Dessa forma dá-se um refinamento de grão nesta zona, bem como uma variação na dureza (abordado na secção 4.6).

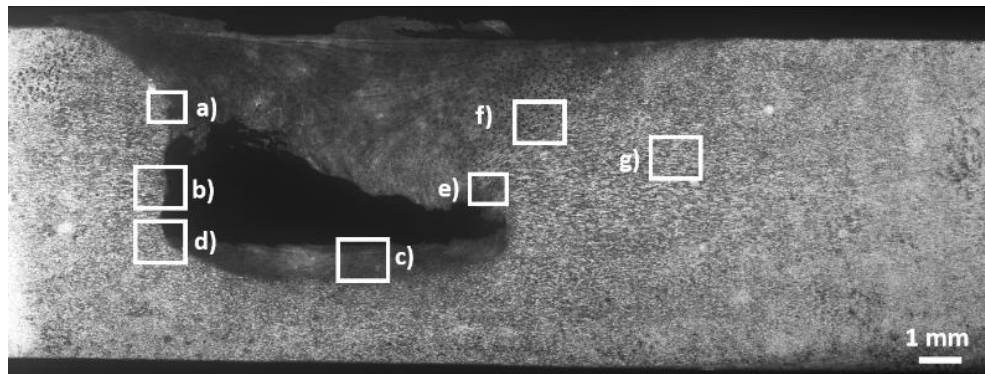


Figura 4-6 – Macrografia de uma secção transversal do canal produzido no ensaio A2_71_900.

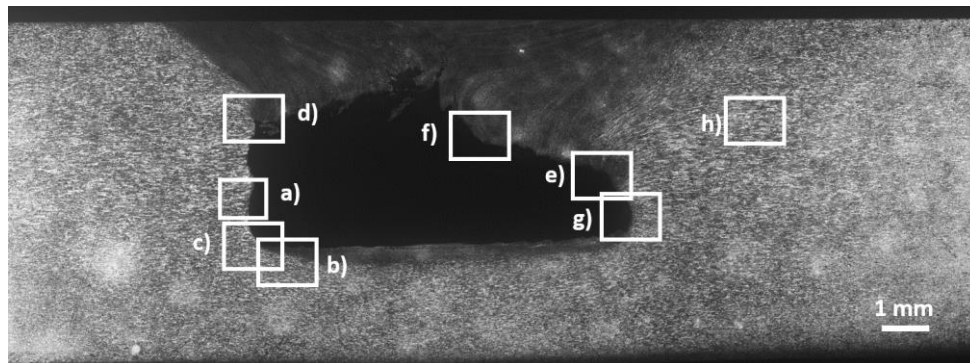


Figura 4-7 – Macrografia de uma secção transversal do canal produzido no ensaio B2_71_900.

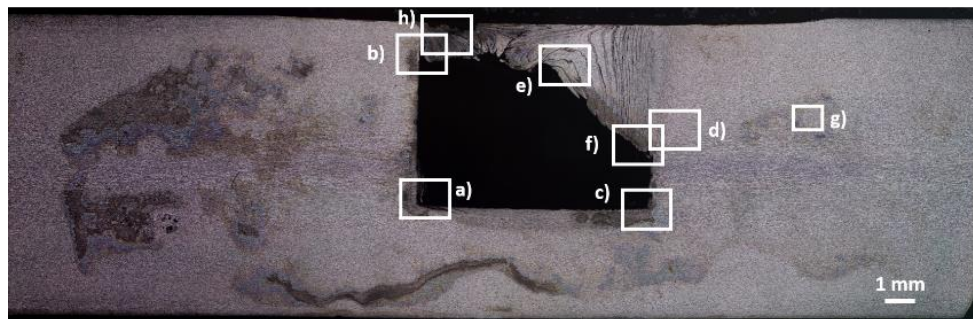


Figura 4-8 – Macrografia de uma secção transversal do canal produzido no ensaio A5_71_450.

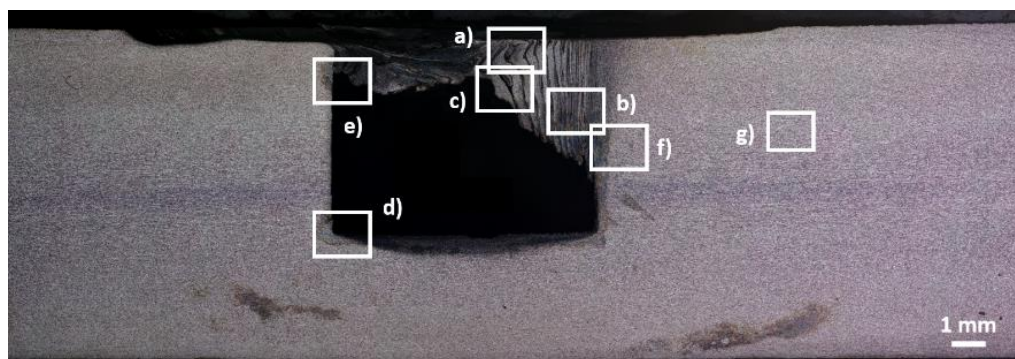


Figura 4-9 – Macrografia de uma secção transversal do canal produzido no ensaio B5_71_450.

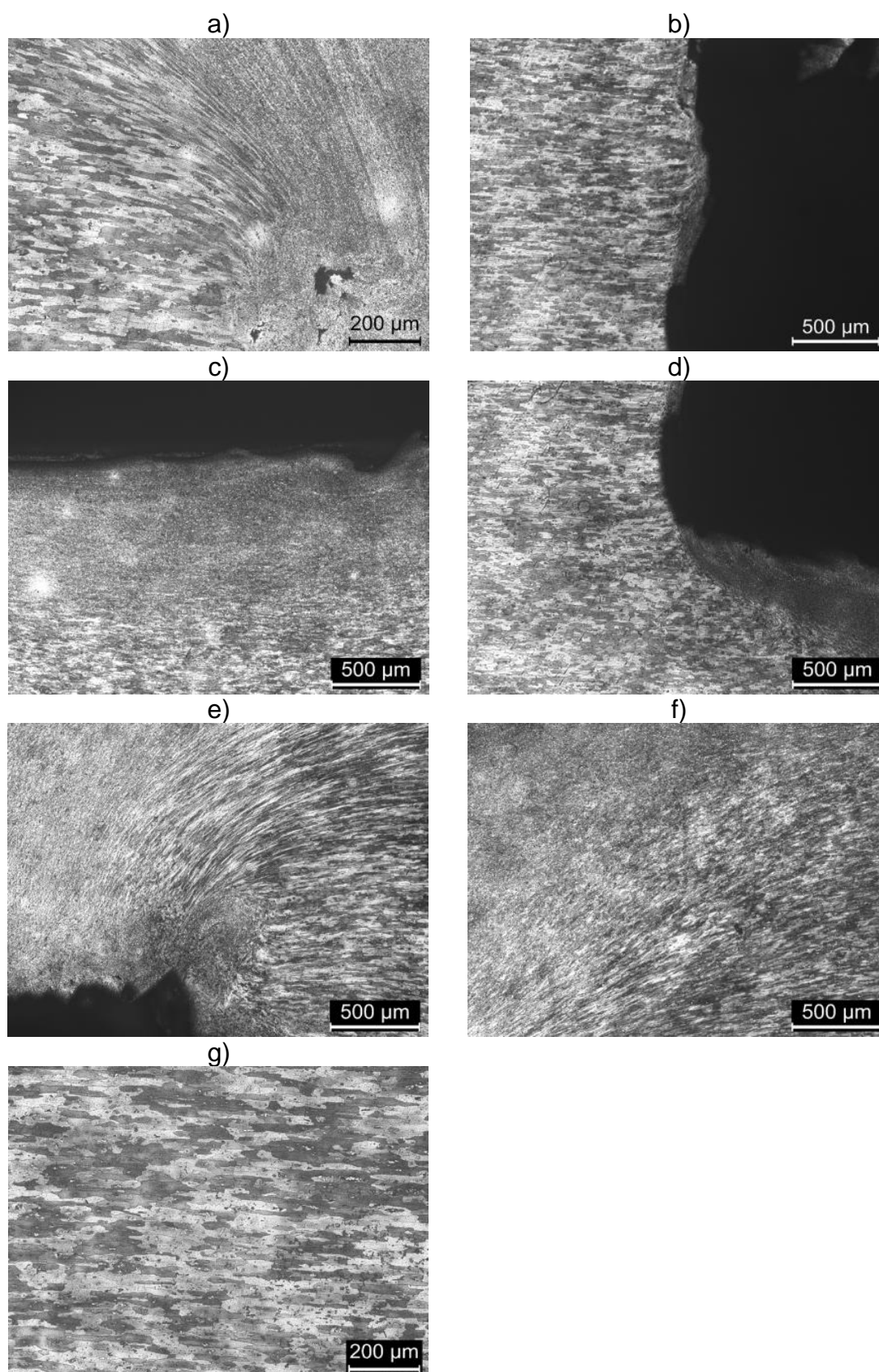


Figura 4-10 - Micrografias das principais zonas do canal produzido no ensaio A2_71_900.

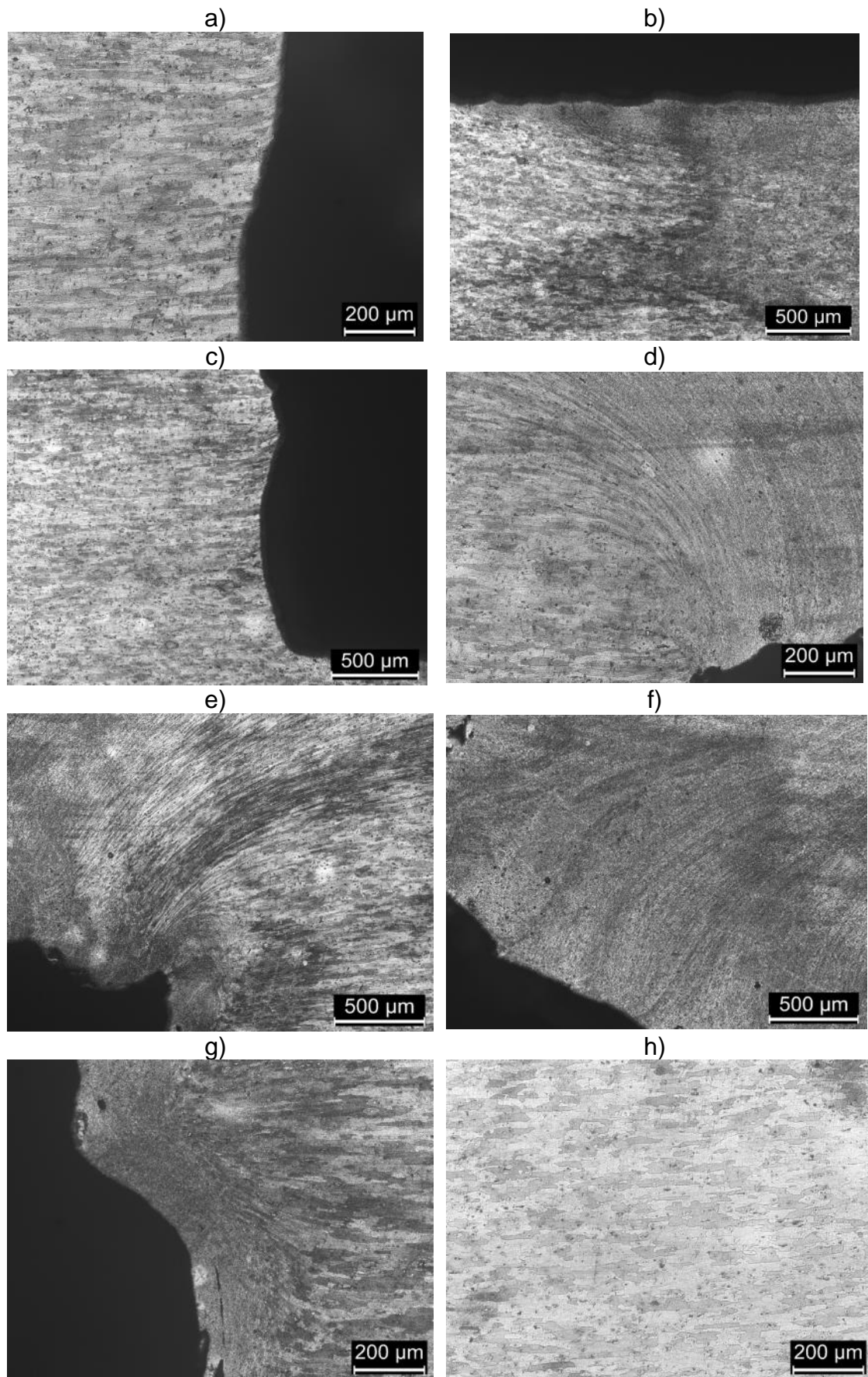


Figura 4-11 - Micrografias das principais zonas do canal produzido no ensaio B2_71_900.

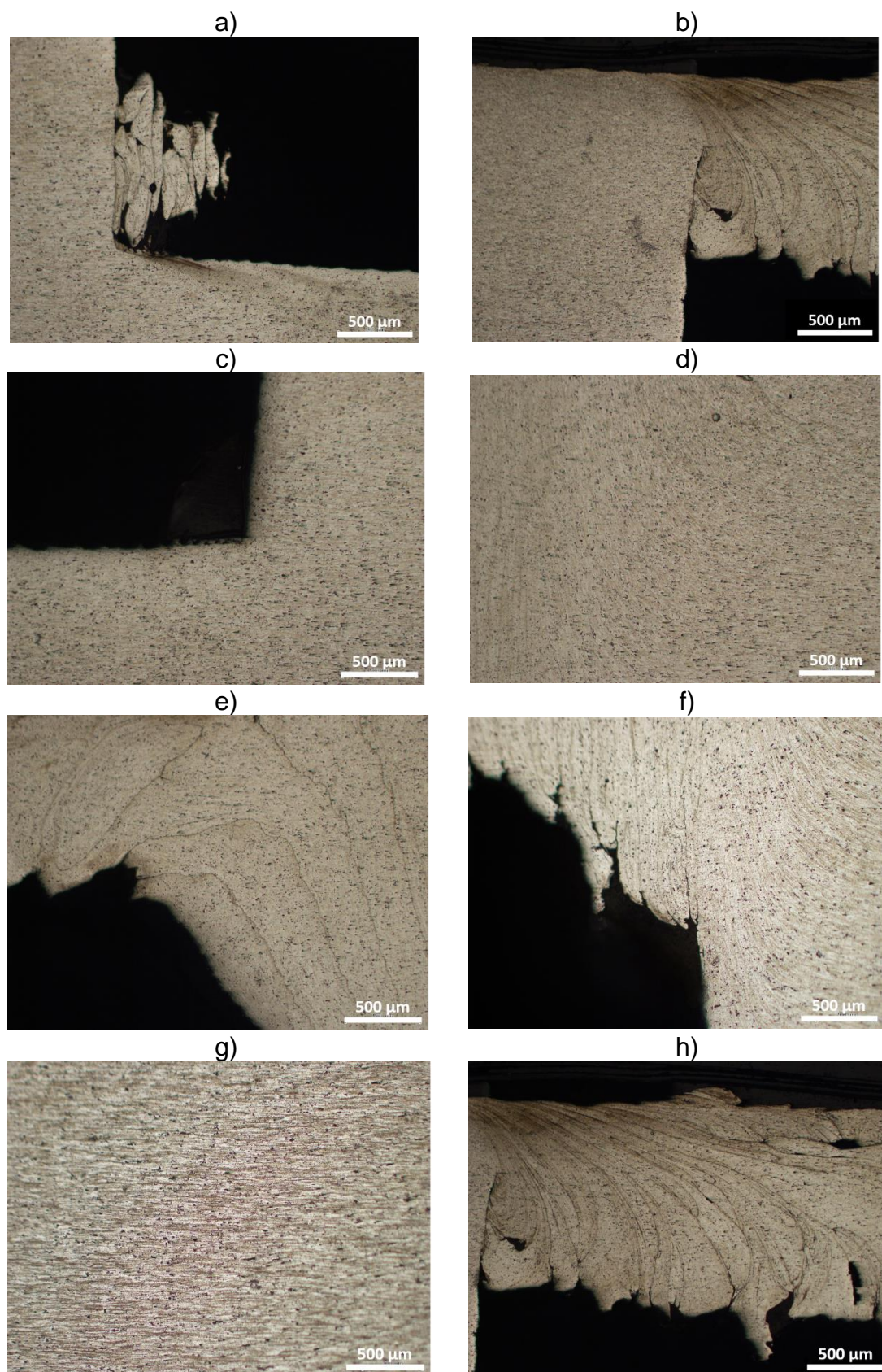


Figura 4-12 - Micrografias das principais zonas do canal produzido no ensaio A5_71_450.

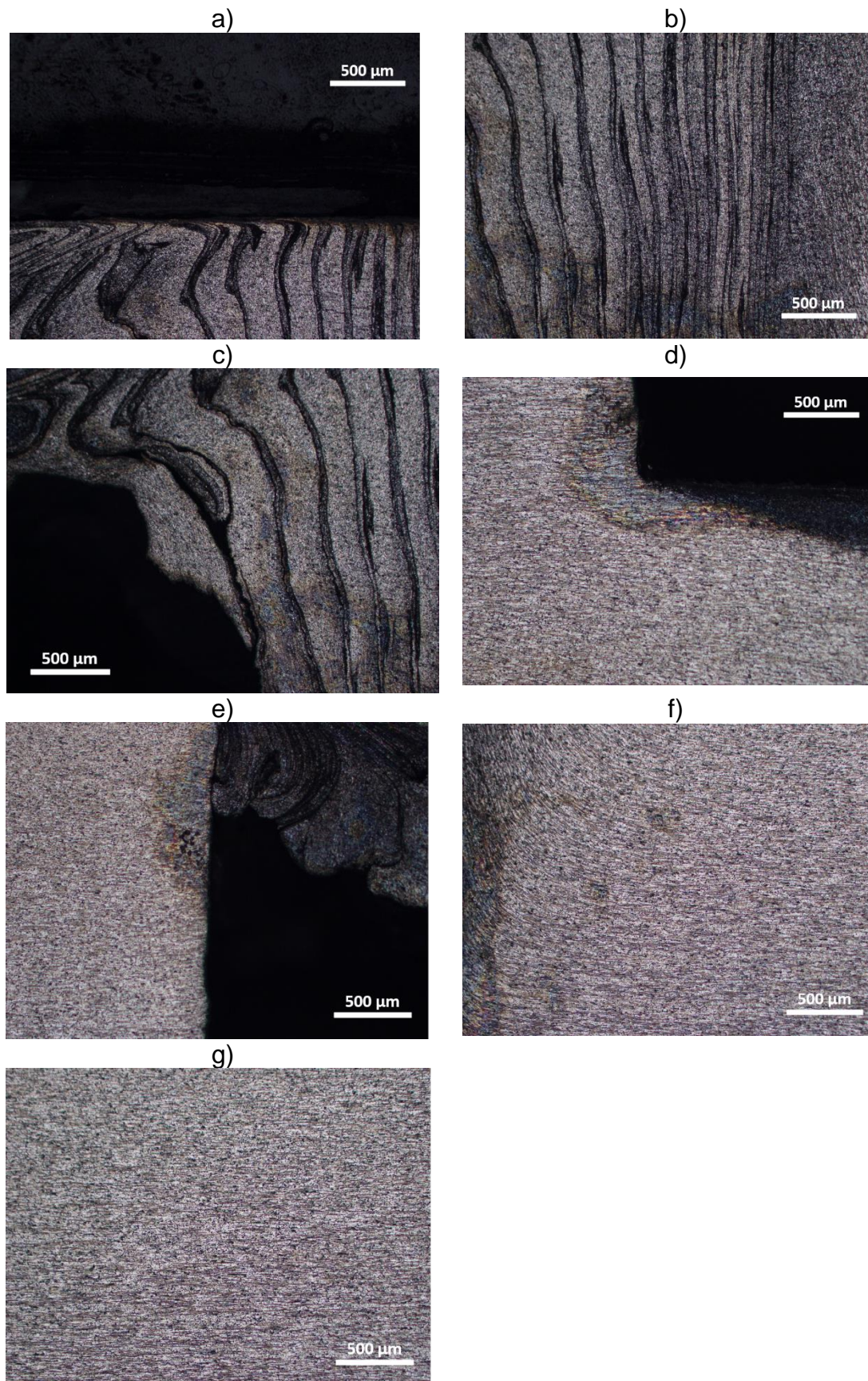


Figura 4-13 - Micrografias das principais zonas do canal produzido no ensaio B5_71_450.

4.4 Rugosidade Interna

Apresentam-se as medições realizadas em quatro canais distintos (provenientes dos ensaios A5_71_450, B5_71_450, A2_71_900 e B2_71_900), de acordo com o descrito no subcapítulo 3.5, Tabela 4-1 e Anexo 2.

Esta é uma característica que é procurada nestes canais pois é um fator importante para algumas das suas possíveis aplicações industriais.

Através dos ensaios realizados, conclui-se que a parede do lado em avanço tem uma rugosidade inferior à da base do canal, no entanto, estas têm uma rugosidade relativa bastante inferior à do topo e à da parede do lado em retrocesso.

Tabela 4-1 - Valores de rugosidade medidos.

		Ra (µm)	Rmax (µm)
A5_71_450	Lado em avanço	2,6	27,0
	Base	12,1	59,9
B5_71_450	Lado em avanço	3,3	25,5
	Base	11,5	80,7
A2_71_900	Base	14,8	89,7
B2_71_900	Base	8,6	89,7

4.5 Caracterização Geométrica dos Canais

O principal objetivo desta tecnologia é a produção de um canal no interior de uma peça. Como referido no Capítulo 2 as principais aplicações destes canais são o transporte de fluidos e a transferência de calor a partir destes. Assim sendo, para além da rugosidade ser um dos parâmetros mais importantes, as dimensões dos canais também têm um grande interesse.

As dimensões consideradas relevantes estão representadas na Figura 4-14, na qual pode observar-se a aproximação que foi realizada à geometria dos canais. Estas dimensões são apresentadas na Tabela 4-2 e serão discutidas nos próximos parágrafos.

Apesar de a geometria presente na Figura 4-14 ser a que melhor se aproxima da generalidade dos canais, os ensaios A5_180_355 e A5_180_280 são melhor representados pela Figura 4-15.

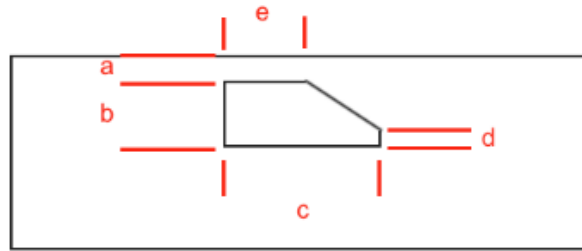


Figura 4-14 – Representação da geometria típica dos canais e das suas cotas principais.

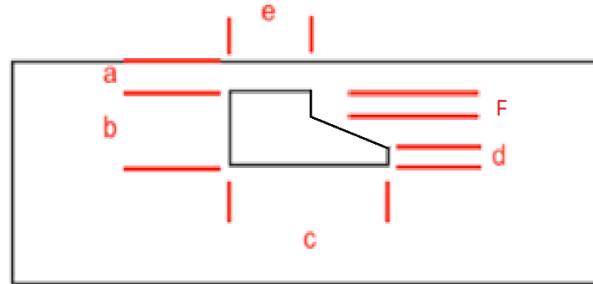


Figura 4-15 - Representação da geometria alternativa dos canais e das suas cotas principais.

Tabela 4-2 – Identificação geométrica dos canais.

Ensaio	a [mm]	b [mm]	c [mm]	d [mm]	e [mm]	f [mm]	Área [mm ²]	Profundidade [mm]
A5_71_450_1*	1,5	4,7	7,8	1,9	4,7	0	32,3	6,2
	1,9	4,0	7,7	1,8	4,1	0	29,2	5,9
B5_71_450*	1,6	4,7	8,0	2,0	4,9	0	32,5	6,3
	2,6	4,3	8,1	2,1	5,8	0	27,6	6,9
A5_71_450_2	1,2	5,1	7,9	1,9	4,3	0	36,6	6,3
B5_90_450	2,0	4,7	7,7	1,2	4,0	0	33,0	6,7
B5_140_450	1,8	4,3	7,9	0,5	0	0	39,2	6,1
A2_71_450*	1,6	4,0	7,9	1,2	0	0	15,8	5,6
	2,3	3,5	8,1	1,9	6,4	0	25,4	5,8
A2_112_450	2,7	3,3	7,9	1,0	4,6	0	20,6	6,0
A2_180_450	1,7	4,1	7,5	0	0	0	15,4	5,8
A2_180_355	1,0	4,5	5,9	0	2,5	2,8	14,1	5,5
A2_180_280	1,9	3,9	6,4	0	2,8	2,6	13,3	5,8
A2_180_900	2,2	3,3	7,9	1,6	6,0	0	22,9	5,5
A2_112_900	2,5	2,7	7,8	0,9	0	0	10,5	5,2
A2_71_900*	2,2	2,9	7,9	1,6	4,5	0	18,0	5,1
	2,5	2,7	7,6	0	3,4	0	14,9	5,2

*Retiradas duas macrografias para se poder estudar a evolução do canal ao longo do seu processamento.

As macrografias das amostras A5_71_450_1 e B5_71_450 permitem comparar dois ensaios em que se tentou replicar todas as condicionantes do primeiro ensaio no segundo, realizando apenas a mudança da base de aço CK45 para a base de baquelite. Com este procedimento pode-se verificar a influência da base na geometria do canal. Apesar de ser notório um aumento considerável na dimensão de e), como se verá nos próximos parágrafos, este fator pode ter origem no controlo de posição (profundidade). Destes resultados não é evidente uma variação originada pela base.

Dos ensaios A5_71_450_1, B5_71_450, A2_71_450 e A2_71_900, foram retiradas duas amostras para análise, desse modo foi possível averiguar a existência de variações geométricas ao longo do canal. Consequentemente pode concluir-se que as dimensões a) e b) variam ao longo dos canais, este facto pode estar relacionado com o controlo de posição, não tendo este permanecido constante ao longo do ensaio (para tentar compensar o aumento de temperatura). Deste modo, as dimensões d) e e) também variam devido ao constrangimento causado pelas alterações de a) e b).

Como referido anteriormente, um fator preponderante relativamente à caracterização geométrica dos canais é a profundidade/penetração do pino que pode ser calculado pela soma das medidas a) e b). Consegue-se observar esta importância na Figura 4-16, onde se apresentam dados relativos aos ensaios A5_71_450_1, B5_71_450 e A5_71_450_2.

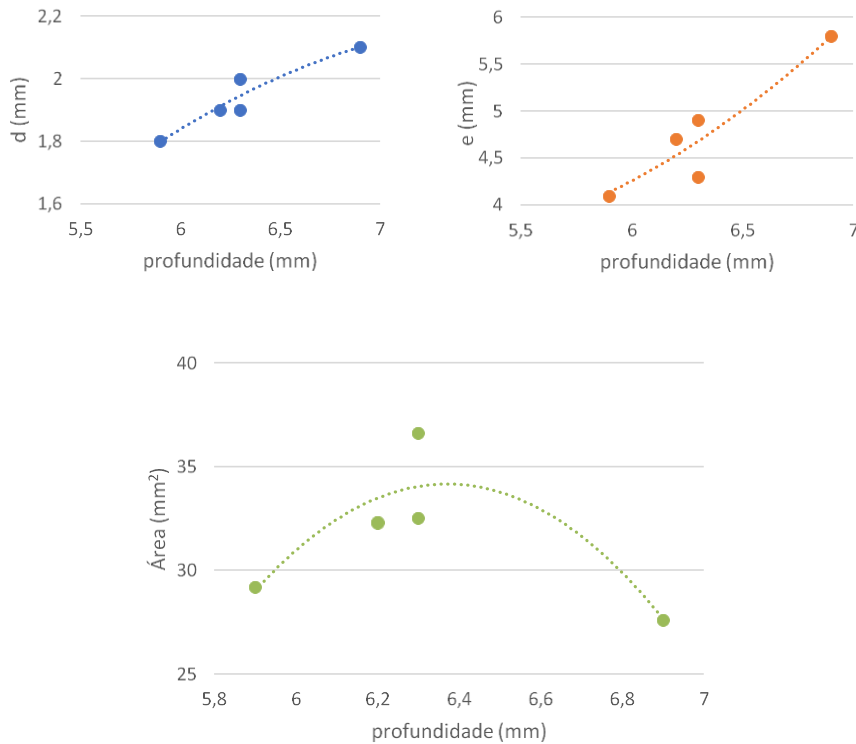


Figura 4-16 - Representações gráficas da relação da profundidade com a geometria e a dimensão do canal.

4.6 Ensaios de Dureza

Realizaram-se quatro ensaios de dureza, um para cada uma das ligas e para cada uma das bases, como ilustra a Figura 4-17. Observam-se dois padrões, um para cada uma das ligas. Na liga AA2017-T451 (tratada termicamente), constata-se um decréscimo acentuado da dureza na ZTMA, seguido de um aumento considerável mas menos significativo na zona do *nugget*. Por outro lado, na liga AA5083-H111 dá-se um ligeiro aumento da dureza na ZTMA e no *nugget*, sendo que este é mais notório no ensaio realizado na base de baquelite.

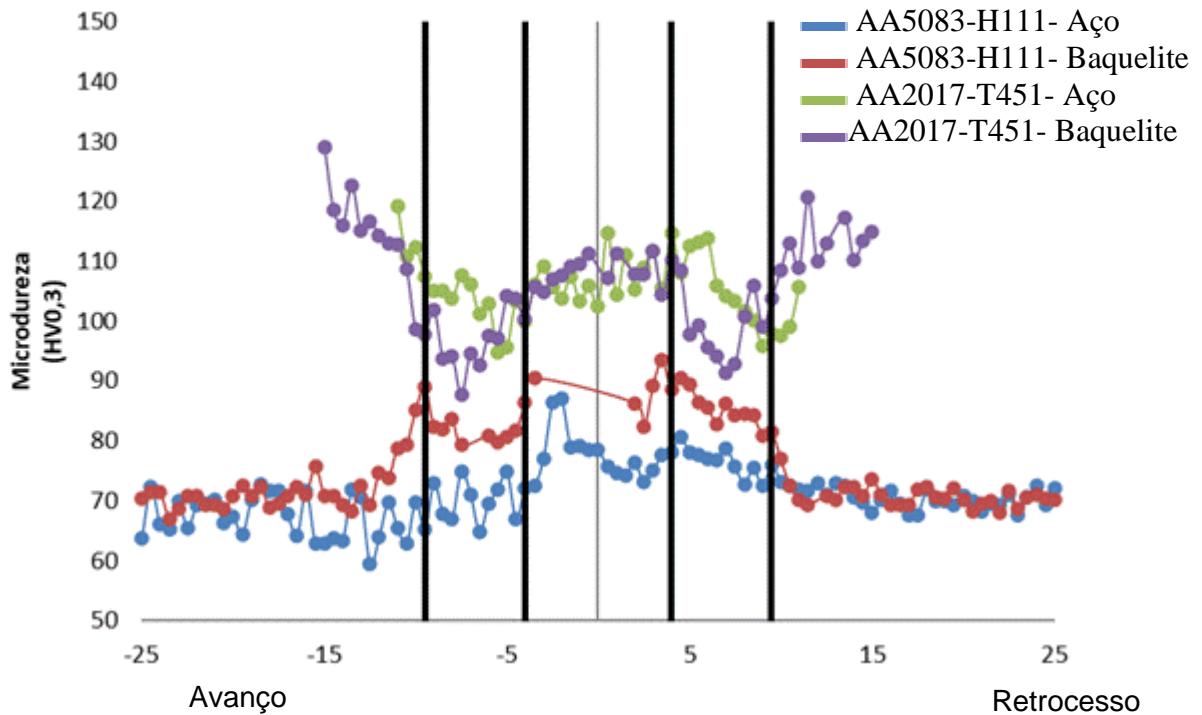


Figura 4-17 - Representação gráfica dos perfis de dureza.

4.7 Inspeção por Correntes Induzidas

As amostras que foram utilizadas para os ensaios de dureza, foram também utilizadas para a realização das correntes induzidas, Anexo 1. Nos ensaios foi realizado um varrimento na superfície processada, do qual se analisou três linhas consecutivas (espaçadas por 0,5 mm).

Recorrendo à calibração referida na secção 3.6, chegou-se à conclusão de que o canal, ou as ramificações do topo do canal só deixavam de ser notadas a uma frequência próxima de 8,7 MHz (S3). Para frequências inferiores o canal era sempre visível. Esta pode ser uma técnica bastante útil para localizar um canal produzido por FSC, a partir de uma superfície lisa, Figura 4-18.

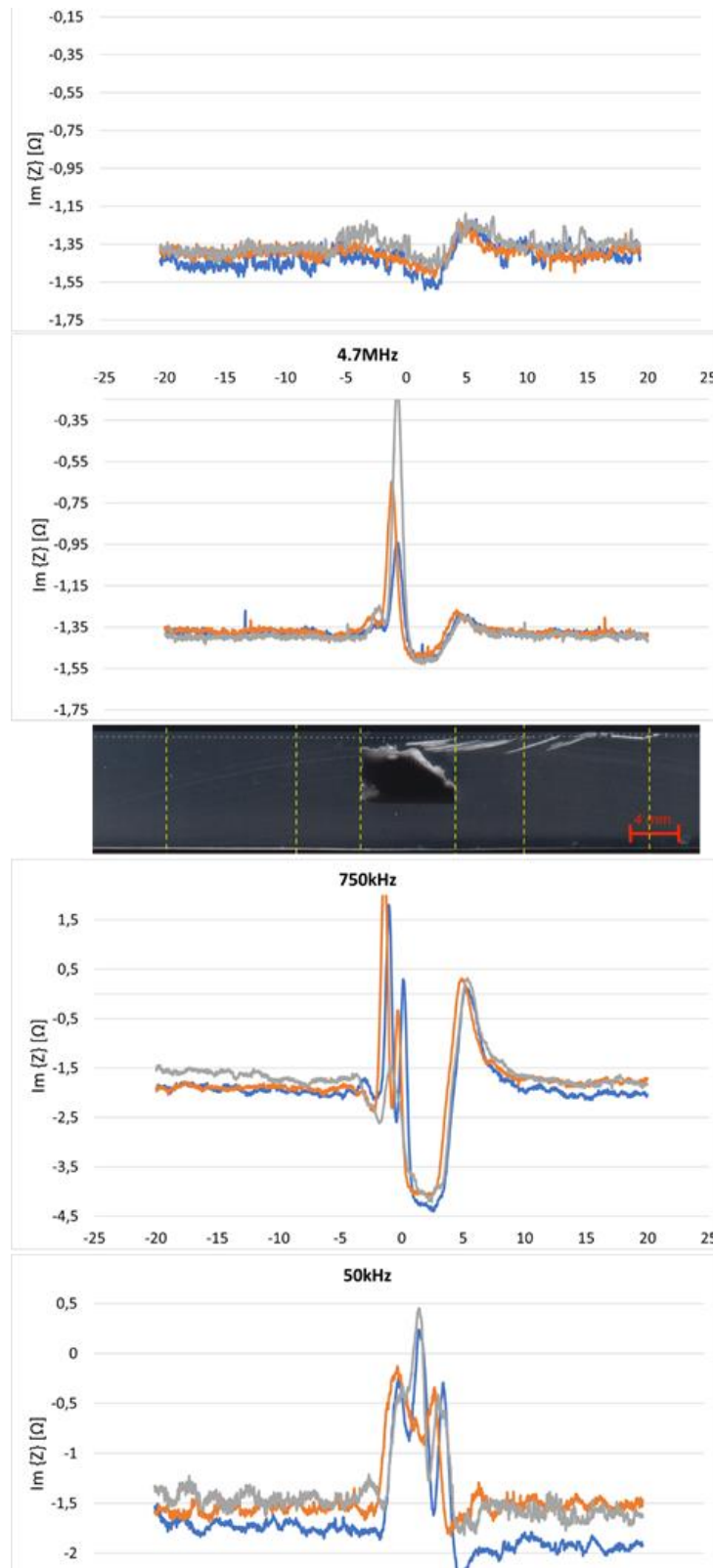


Figura 4-18 – Resultados da inspeção por correntes induzidas relativos à amostra A5_71_450.

Das inspeções efetuadas nos canais produzidos sobre a base de baquelite não foram retiradas conclusões porque os pequenos defeitos superficiais e subsuperficiais, presentes em todas as amostras, mascaram as restantes leituras, Figura 4-19.

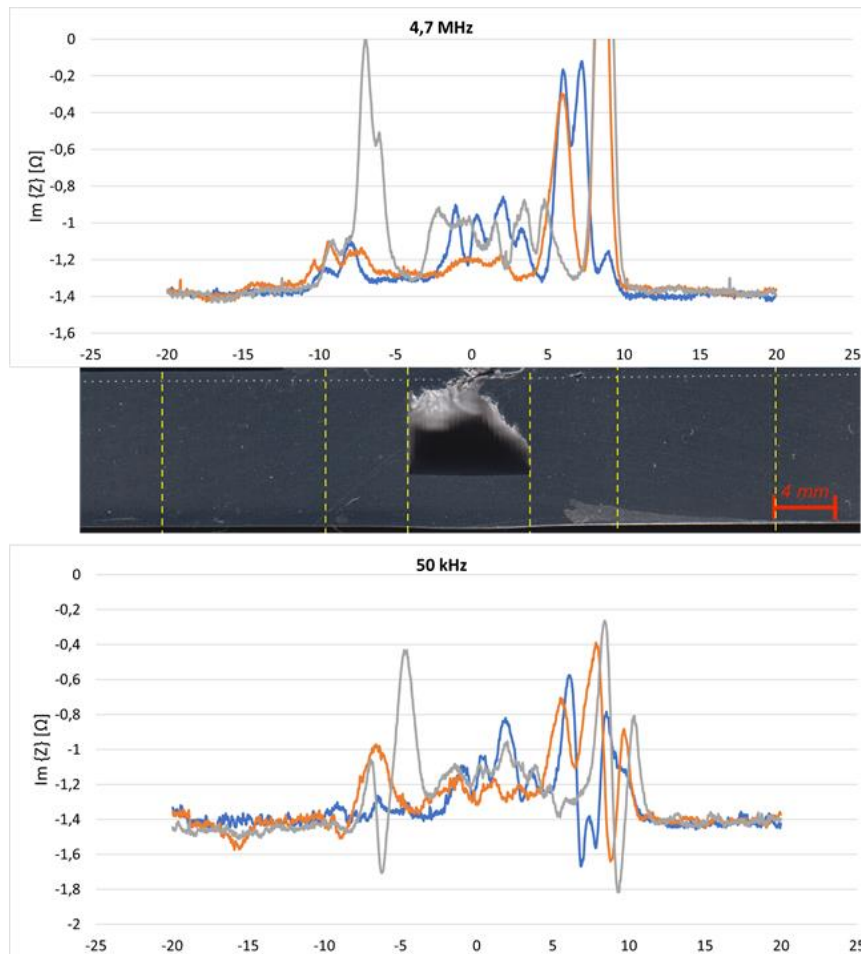


Figura 4-19 - Correntes induzidas relativas à amostra B5_71_900.

4.8 Eficiência Energética

Para o estudo da eficiência energética optou-se por realizar dois ensaios distintos, um para cada liga (A5_71_450 e A2_71_900). Utilizou-se a metodologia apresentada na secção 3.8. Em suma, para o cálculo desta é necessário obter ou calcular a energia utilizada ($E_{elé}$) e as energias térmicas absorvidas pela base, pela chapa e pela ferramenta.

Na Figura 4-20, encontram-se as representações gráficas de algumas variações de temperatura (utilizadas para calcular a energia térmica absorvida pela base). O outro gráfico permitiu calcular a energia fornecida ao equipamento. As energias térmicas absorvidas pela ferramenta e pela chapa foram calculadas pela diferença de temperaturas das mesmas antes e no final de cada ensaio (as temperaturas foram retiradas utilizando a câmara termográfica referida na subsecção 3.2.4), Equação (3-5). Os dados calculados são apresentados na Tabela 4-3.

Após o cálculo da energia útil e dos rendimentos respetivos, detetou-se uma divergência de resultados inesperada (uma diferença de rendimentos de 55% para 18%). Apesar dos pequenos erros que pudessem ter ocorrido, desde a criação do modelo (e as suas simplificações) e dos erros relativos às medições realizadas, esta discrepância não poderia assim ser justificada. No entanto e como se observa na Tabela 4-3, com a exceção da energia útil, as energias determinadas têm a mesma ordem de grandeza nos dois ensaios. Contudo, as energias fornecidas têm uma discrepância acentuada, o que por sua vez interfere com a quantidade de energia útil do processo (nas duas situações). A necessidade de mais energia no equipamento (no ensaio A5_71_450), e menos energia útil (no ensaio A2_71_900) poderá estar relacionado com os seguintes pontos: comprimento do pino (no primeiro $h_p = 6,7$ mm e no segundo $h_p = 5,5$ mm), variação dos parâmetros utilizados (velocidade de rotação), ligas diferentes e variações no controlo de posição.

Tabela 4-3 - Resultados obtidos nos ensaios de FSC para determinação da eficiência energética do processo.

	A5_71_450	A2_71_900
Energia utilizada (J)	386 026	218 582
Energia retida pela base (J)	145 789	150 999
Energia dissipada pela chapa (J)	10 243	8 651
Energia retida pela ferramenta (J)	17 549	19 854
Energia útil* (J)	212 445	39 079
Rendimento	55%	18%

*Energia necessária para a deformação plástica.

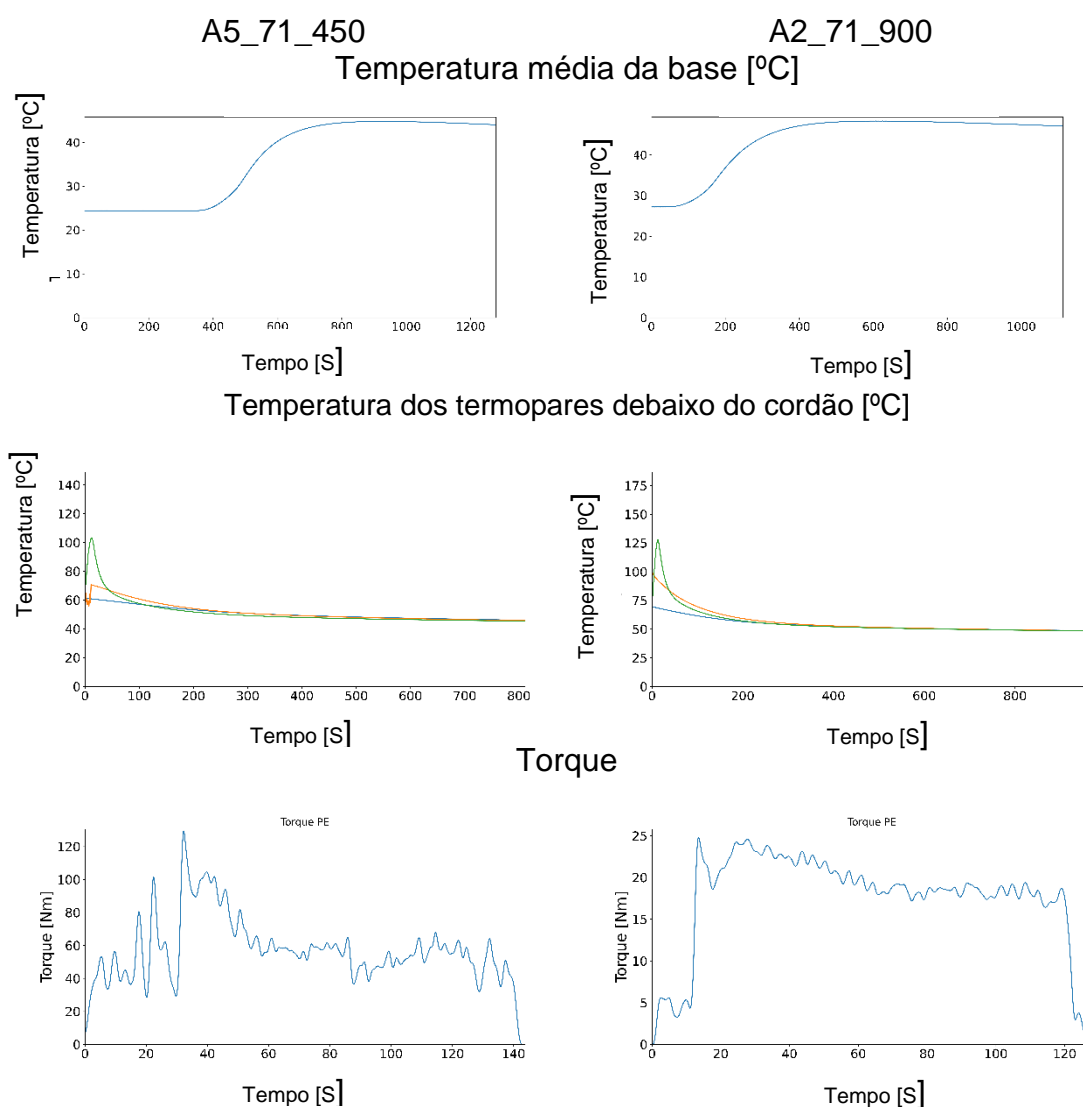


Figura 4-20 - Representações gráficas dos dados relativos ao cálculo da eficiência energética.

Os pontos referidos acima deverão/poderão ser objeto de um estudo futuro, para averiguar melhor a eficiência real do processo e quais os fatores que a influenciam.

Capítulo 5

Neste capítulo serão apresentadas as conclusões finais da dissertação juntamente com os trabalhos futuros, incluindo o estudo da aplicação de uma base refrigerada projetada no decorrer desta tese.

5 Conclusões e Desenvolvimentos Futuros

5.1 Conclusões e Comentários Finais

Na revisão da literatura efetuada não foi encontrado nenhum estudo relativo à importância da base na tecnologia FSC. Os trabalhos publicados mencionam que o componente a processar é fixo na mesa de trabalho do equipamento utilizado, mas não fazem referência ao material de que a mesma é feita. Nesta dissertação procurou-se, sobretudo, perceber se a base tem alguma influência no processo FSC e/ou nos canais produzidos. As conclusões mais relevantes do trabalho desenvolvido são apresentadas nos pontos abaixo.

- A base tem uma grande influência nos resultados e na estacionariedade do processo.
- Esta tecnologia necessita permanecer num regime estacionário (condições de pressão e temperatura constantes) para que os canais sejam produzidos com sucesso, tornando assim a base de baquelite desadequada à tecnologia.
- Outra variável a ter em consideração é o controlo de posição do pino, pois as temperaturas e pressões atingidas variam com esta. Ou seja, ligando este ponto com o anterior, o controlo de posição do pino tem uma grande importância na obtenção das condições ideais à produção dos canais.

- O comprimento do pino vai influenciar o fluxo de material existente na fronteira entre a ZTMA e a zona do *nugget*. Quanto maior o pino (h_p) maior será a influência deste no fluxo (ascendente) de material, enquanto que na situação contrária (um h_p inferior) a pressão exercida pelo *shoulder* tem maior preponderância tornando este fluxo descendente.
- Os canais apresentam superfícies completamente irregulares e outras com rugosidades bastante reduzidas. Estas características podem ser benéficas para grande parte das aplicações industriais.
- A inspeção por correntes induzidas permite localizar o canal sem que seja necessário cortar a peça.
- Os métodos utilizados para o cálculo da eficiência energética do processo permitiram determinar as eficiências para dois ensaios com a mesma base, mas velocidades e materiais (ligas de alumínio) diferentes. O que por sua vez permitiu notar uma discrepância entre estes. Deste modo, considera-se que se justifica a necessidade de um estudo mais aprofundado a este respeito, secção 5.2.

5.2 Propostas para Desenvolvimentos Futuros

As geometrias, tanto do shoulder como do pino, podem ser mais ou menos adequadas à realização deste processo. Com o objetivo de melhorar os canais produzidos, precedeu-se à conceção tanto de bases de ferramentas como de pinos, Tabela 5-1 e





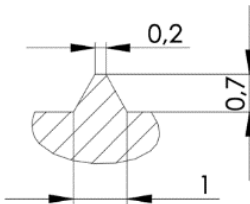
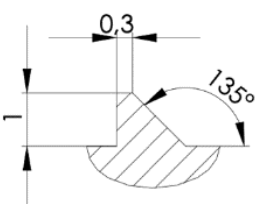
	L	N	O	M
Base da ferramenta				
Estria da base da ferramenta				

Tabela 5-2, respetivamente. Estas relações geométricas das ferramentas já foram abordadas com êxito [2] , e poderão vir a ser tema de estudo em futuras dissertações.

Tabela 5-1 - Bases das ferramentas concebidas e especificações das suas estrias.





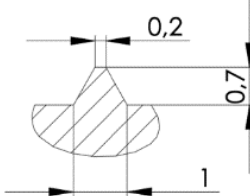
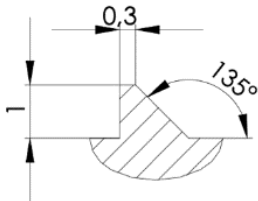


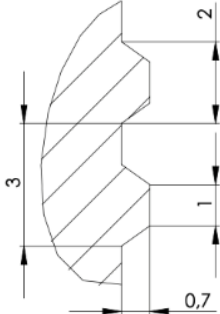
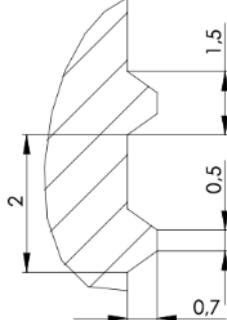
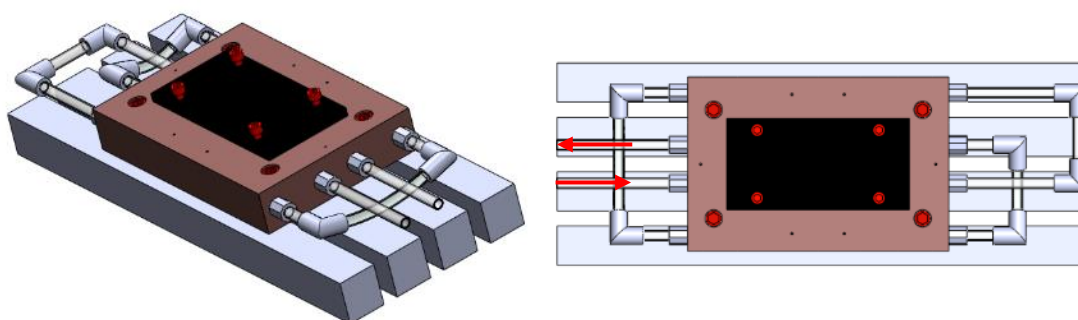
	L	N	O	M
Base da ferramenta				
Estria da base da ferramenta				

Tabela 5-2 - Pinos concebidos e especificações dos perfis de rosca.

	G	H
Pino		
Perfil da rosca		

Durante os ensaios concluiu-se que a temperatura do processo influencia bastante os resultados obtidos, isto é, os canais produzidos. Contudo, a única forma de controlar a temperatura do processo consiste em alterar a velocidade de rotação, ou a velocidade de avanço da ferramenta, o que por sua vez influencia tanto a geometria como o tamanho do canal. Optou-se por desenvolver uma base refrigerada, que se pretende que mantenha constante a temperatura ao longo do processo, e que seja controlável através da velocidade de circulação do fluido de refrigeração e da sua temperatura, Figura 5-1. A esta base estará associado um sistema de refrigeração, composto por uma arca *MEIRELES MFA 150 W* (de -18 até -24 °C), anticongelante G12 (ponto de recristalização -31°C) e poderá ter uma ou duas bombas dependendo de se pretender realizar um circuito único, Figura 5-1 a), ou um circuito duplo. Assim conseguimos controlar a temperatura da base e do processo e garantir a estacionariedade do último.



a) b)
Figura 5-1- a) Vista em perspectiva do sistema de refrigeração b) Vista superior de um dos possíveis circuitos de refrigeração.

Assim, poder-se-á estudar a influencia de uma base refrigerada (Figura 5-2) no processo e determinar se existe uma temperatura ideal para a realização do mesmo, bem como avaliar como varia a janela de parâmetros do processo com a temperatura da base.



Figura 5-2 - Base de cobre com sistema de refrigeração e de fixação finalizada.

Relativamente às técnicas de ensaios não destrutivos, por meio de correntes induzidas (CI), pode-se aprofundar a técnica de localização de canais ou estudar-se a possibilidade de determinar/comparar a penetração do pino.

Sugere-se também um estudo mais exaustivo relativamente à eficiência energética do FSC e da influência quer das ligas processadas quer dos parâmetros e da base (ou o calor que é escoado por esta) utilizados nos canais produzidos.

Referências Bibliográficas

- [1] F. S. Tooling, "Introduction, Chapter 1 in Friction Stir Welding and Processing," *ASM Int. Ed. Rajiv S. Mishra Murray W. Mahoney*, pp. 7–35, 2007, doi: 10.1361/fswp2007p001.
- [2] C. Vidal, "Development and Mechanical Characterization of a New Manufacturing Technology: Friction Stir Channelling," Universidade de Lisboa Instituto Superior Técnico, 2014.
- [3] M. (US) Rajiv S. Mish, Rolla, "Integral channels in metal components and fabrication thereof," US 6,923,362 B2, 2005.
- [4] M. Ferraz, "Friction Stir Channeling Industrial Applications," no. May, pp. 1–82, 2012.
- [5] N. Balasubramanian, R. S. Mishra, and K. Krishnamurthy, "Friction stir channeling: Characterization of the channels," *J. Mater. Process. Technol.*, vol. 209, no. 8, pp. 3696–3704, 2009, doi: 10.1016/j.jmatprotec.2008.08.036.
- [6] N. Balasubramanian, R. S. Mishra, and K. Krishnamurthy, "Process forces during friction stir channeling in an aluminum alloy," *J. Mater. Process. Technol.*, vol. 211, no. 2, pp. 305–311, 2011, doi: 10.1016/j.jmatprotec.2010.10.005.
- [7] A. Rashidi, A. Mostafapour, V. Rezazadeh, and S. Salahi, "Channel formation in modified friction stir channeling," *Appl. Mech. Mater.*, vol. 302, no. February 2018, pp. 371–376, 2013, doi: 10.4028/www.scientific.net/AMM.302.371.
- [8] A. Rashidi and A. Mostafapour, "Influence of tool pin geometry and moving paths of tool on channel formation mechanism in modified friction stir channeling technique," *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, vol. 80, no. 5–8, pp. 1087–1096, 2015, doi: 10.1007/s00170-015-7049-7.
- [9] C. Vidal, R. Baptista, and V. Infante, "Experimental and numerical investigation on the fatigue behaviour of friction stirred channel plates," *Eng. Fail. Anal.*, vol. 103, no. April, pp. 57–69, 2019, doi: 10.1016/j.engfailanal.2019.04.068.
- [10] C. Vidal and V. Infante, "Role of friction stir channel geometry on the fatigue behaviour of AA5083-H111 at 120°C and 200°C," *Adv. Mater. Res.*, vol. 891–892, pp. 1494–1499, 2014, doi: 10.4028/www.scientific.net/AMR.891-892.1494.
- [11] C. Vidal, V. Infante, and P. Vilaça, "Fatigue assessment of friction stir channels,"

- Int. J. Fatigue*, vol. 62, pp. 77–84, 2014, doi: 10.1016/j.ijfatigue.2013.10.009.
- [12] H. Karvinen, D. Nordal, T. Galkin, and P. Vilaça, “Application of hybrid friction stir channeling technique to improve the cooling efficiency of electronic components,” *Weld. World*, vol. 62, no. 3, pp. 497–509, 2018, doi: 10.1007/s40194-018-0576-8.
- [13] D. Nordal, “Design, Development and Analysis of Tools for Hybrid Friction Stir Channeling,” Aalto University School of Engineering, 2017.
- [14] J. GANDRA, “Method and apparatus for creating channels in workpieces,” WO 2018/083438 A1, 2018.
- [15] C. Vidal, V. Infante, and P. Vilaça, “Fatigue behaviour at elevated temperature of friction stir channelling solid plates of AA5083-H111 aluminium alloy,” *Int. J. Fatigue*, vol. 62, pp. 85–92, 2014, doi: 10.1016/j.ijfatigue.2013.10.012.
- [16] C. Vidal, R. Baptista, and V. Infante, “Experimental and numerical investigation on the fatigue behaviour of friction stirred channel plates,” *Eng. Fail. Anal.*, vol. 103, no. January, pp. 57–69, 2019, doi: 10.1016/j.engfailanal.2019.04.068.
- [17] C. Vidal, V. Infante, and P. Vilaça, “Characterisation of fatigue fracture surfaces of friction stir channelling specimens tested at different temperatures,” *Eng. Fail. Anal.*, vol. 56, pp. 204–215, 2015, doi: 10.1016/j.engfailanal.2015.02.009.
- [18] C. Vidal, V. Infante, and P. Vilaça, “Metallographic and morphological characterization of sub-surface friction stirred channels produced on AA5083-H111,” *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, vol. 105, no. 5–6, pp. 2215–2235, 2019, doi: 10.1007/s00170-019-04459-7.
- [19] S. Pandya, R. S. Mishra, and A. Arora, “Channel formation during friction stir channeling process — A material flow study using X-Ray micro-computed tomography and optical microscopy,” *J. Manuf. Process.*, vol. 41, no. January, pp. 48–55, 2019, doi: 10.1016/j.jmapro.2019.03.021.
- [20] H. Karvinen, A. H. Aleni, P. Salminen, T. Minav, and P. Vilaça, “Thermal efficiency and material properties of friction stir channelling applied to aluminium alloy AA5083,” *Energies*, vol. 12, no. 8, 2019, doi: 10.3390/en12081549.
- [21] R. Kumar, K. Singh, and S. Pandey, “Process forces and heat input as function of process parameters in AA5083 friction stir welds,” *Trans. Nonferrous Met. Soc. China (English Ed.)*, vol. 22, no. 2, pp. 288–298, 2012, doi: 10.1016/S1003-6326(11)61173-4.
- [22] S. Salimi, M. Haghpanahi, and P. Bahemmat, “Fabrication of cooling channels employing worm voids caused by friction stir based process: Considering cooling

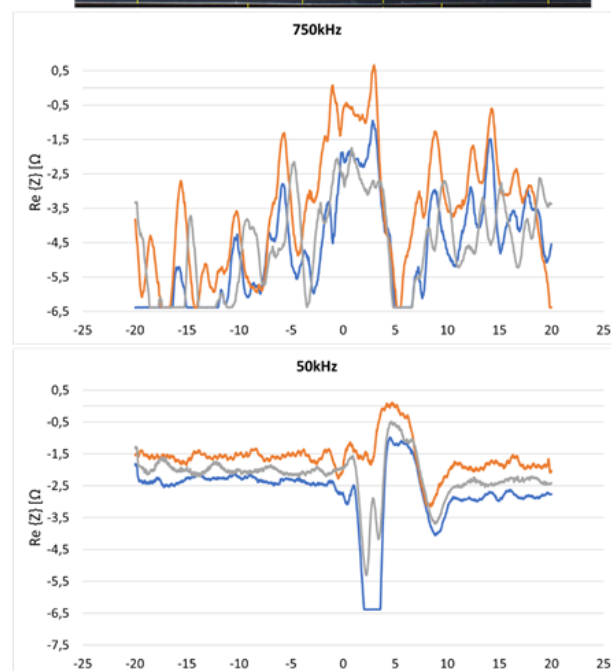
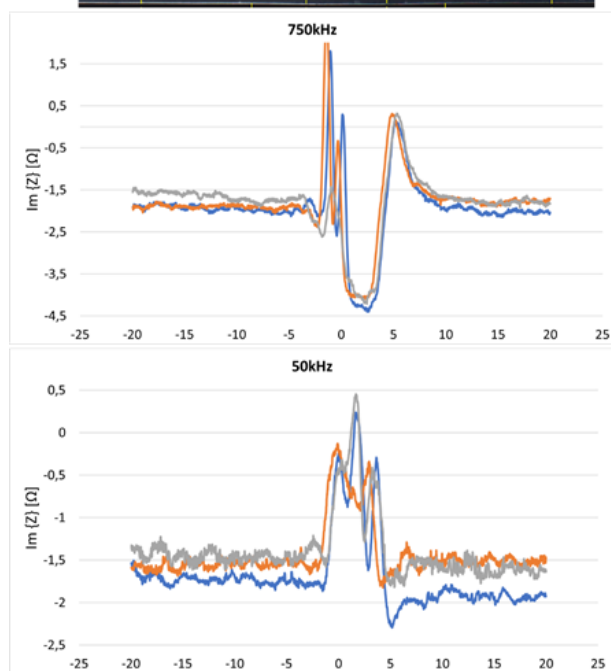
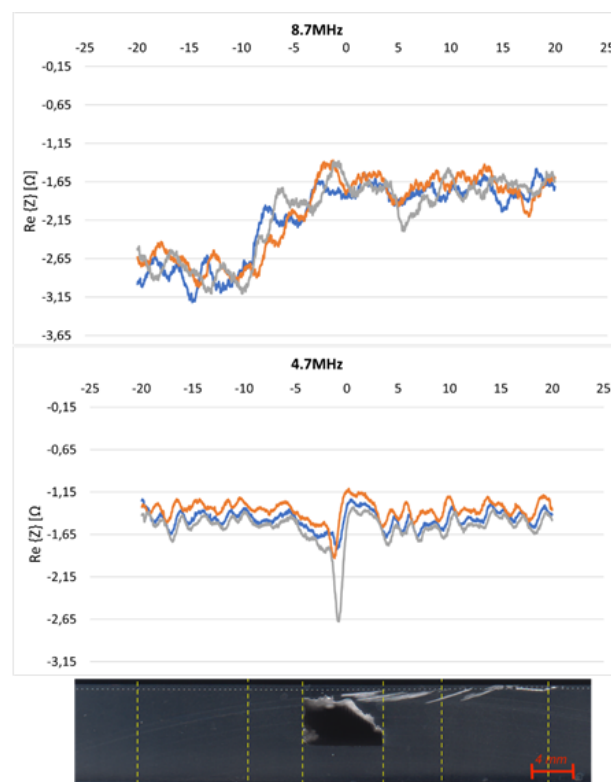
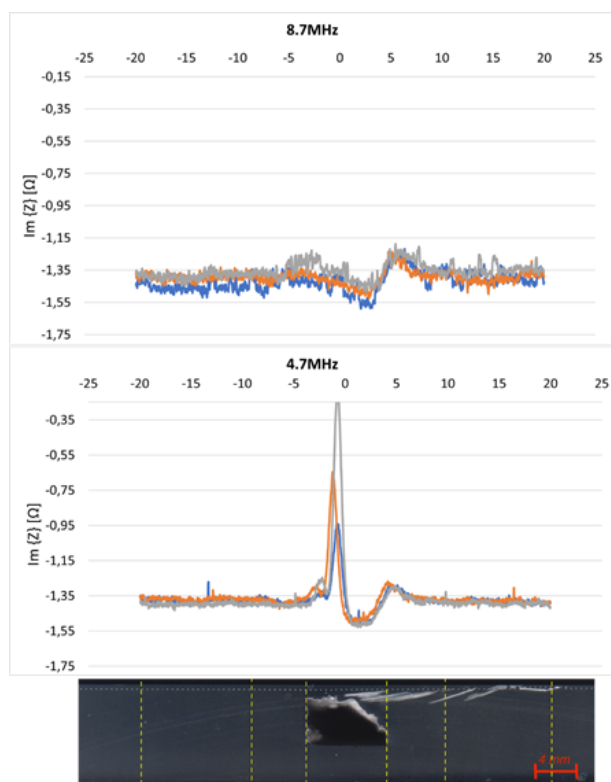
- and fluid parameters,” *J. Manuf. Process.*, vol. 35, no. March, pp. 61–70, 2018, doi: 10.1016/j.jmapro.2018.07.016.
- [23] C. Vidal, V. Infante, and P. Vilaça, “Mechanical characterization of friction stir channels under internal pressure and in-plane bending,” *Key Eng. Mater.*, vol. 488–489, pp. 105–108, 2012, doi: 10.4028/www.scientific.net/KEM.488-489.105.
- [24] C. Vidal, V. Infante, and P. Vilaça, “Effect of microstructure on the fatigue behavior of a friction stirred channel aluminium alloy,” *Procedia Eng.*, vol. 66, pp. 264–273, 2013, doi: 10.1016/j.proeng.2013.12.081.
- [25] C. Vidal, V. Infante, and P. Vilaça, “Metallographic characterization of friction stir channels,” *Mater. Sci. Forum*, vol. 730–732, pp. 817–822, 2013, doi: 10.4028/www.scientific.net/MSF.730-732.817.
- [26] C. Vidal, V. Infante, Y. Lage, and P. Vilaça, “Modelling microstructural effects on the mechanical behaviour of a friction stirred channel aluminium alloy,” *Key Eng. Mater.*, vol. 577–578, pp. 37–40, 2014, doi: 10.4028/www.scientific.net/KEM.577-578.37.
- [27] C. Vidal, “Processo de abertura de canais internos contínuos em componentes maciços sem alteração da cota de superfície processada e respectiva ferramenta modular ajustável,” PT 105628, 2012.
- [28] F. Sr, “A Non-Consumable Tool and a Process for Solid-State Production of a Channel and a Weld Joint, and a Structure of at Least Two Components Based on Originally Bulk Components of Similar, or Dissimilar, Materials,” US 2019/0210147 A1, 2019.
- [29] A. H. Aleni, “Development of Technological Conditions and Applications of Friction Stir Channeling,” Tallinn University of Technology, 2014.
- [30] R. P. Singh, S. Dubey, A. Singh, and S. Kumar, “A review paper on friction stir welding process,” *Mater. Today Proc.*, no. xxxx, pp. 5–10, 2020, doi: 10.1016/j.matpr.2020.05.208.
- [31] “FSW,” 2013. <https://www.caranddriver.com/features/a15115566/two-metals-enter-one-metal-leaves-the-miracle-of-friction-stir-welding-tech-dept/> (accessed Nov. 30, 2019).
- [32] J. Gandra and A. E. Show, “Friction Stir Channelling: A leaner method of manufacturing heat exchangers for aerospace,” no. November. TWI, 2018.
- [33] V. P. Astakhov, “Drilling,” in *Modern Machining Technology*, Woodhead Publishing, 2011, pp. 79–212.

- [34] "CostumPartNet," 2007.
<https://www.custompartnet.com/images/calculator/speed-feed-drilling.png>.
(accessed Dec. 15, 2019).
- [35] H. Hocheng, W. T. Lei, and H. S. Hsu, "Preliminary study of material removal in electrical-discharge machining of SiC/Al," *J. Mater. Process. Technol.*, vol. 63, no. 1–3, pp. 813–818, 1997, doi: 10.1016/S0924-0136(96)02730-6.
- [36] M. Munz, M. Risto, and R. Haas, "The Phenomenon of Polarity in EDM Drilling Process Using Water Based Dielectrics," *Procedia CIRP*, vol. 42, no. Isem Xviii, pp. 532–536, 2016, doi: 10.1016/j.procir.2016.02.246.
- [37] T. A. Spedding and Z. Q. Wang, "Study on modeling of wire EDM process," *J. Mater. Process. Technol.*, vol. 69, no. 1–3, pp. 18–28, 1997, doi: 10.1016/S0924-0136(96)00033-7.
- [38] P. Malhotra, R. K. Tyagi, N. K. Singh, and B. Singh, "Materials Today : Proceedings Experimental investigation and effects of process parameters on EDM of Al7075 / SiC composite reinforced with magnesium particles," *Mater. Today Proc.*, no. xxxx, 2019, doi: 10.1016/j.matpr.2019.11.069.
- [39] M. F. Mohamed and K. Lenin, "Optimization of Wire EDM process parameters using Taguchi technique," *Mater. Today Proc.*, no. xxxx, 2019, doi: 10.1016/j.matpr.2019.06.662.
- [40] F. J. Campa and A. Lamikiz, "Milling," *Metalwork. Prod.*, vol. 145, no. 3, pp. 13–16, 2001, doi: 10.1533/9780857094940.213.
- [41] ThyssenKrupp, "Material Data Sheet 5083-O H111," *ThyssenKrupp*. p. 2, 2013, [Online]. Available: http://www.thyssenkruppmaterials.co.uk/Downloads/Download_Files/Aluminium_Datasheets/5083-O H111.pdf.
- [42] R. J. et. a. Rafael Nunes, J.H.Adams, Mitchell Ammoms, Howard S Avery, *ASM HANDBOOK- Properties and Selection: Nonferrous Alloys and Special-Purpose Materials*, vol. 2, no. 7. ASM international, 1990.
- [43] C. Vidal, V. Infante, and P. Vilaça, "Monitoring of the mechanical load and thermal history during friction stir channelling under constant position and constant force control modes," *J. Manuf. Process.*, vol. 49, no. April 2019, pp. 323–334, 2020, doi: 10.1016/j.jmapro.2019.11.016.
- [44] G. L. Sorger *et al.*, "Non-destructive microstructural analysis by electrical conductivity: Comparison with hardness measurements in different materials," *J. Mater. Sci. Technol.*, vol. 35, no. 3, pp. 360–368, 2019, doi: 10.1016/j.jmst.2018.09.047.

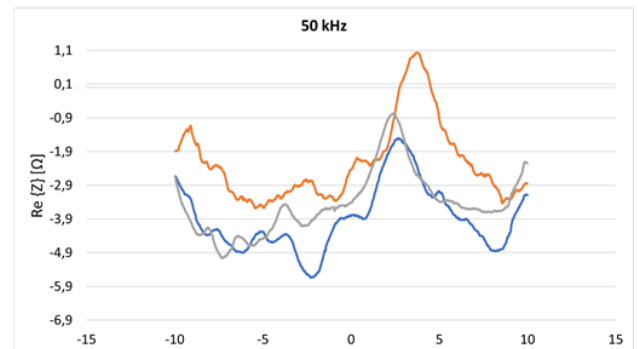
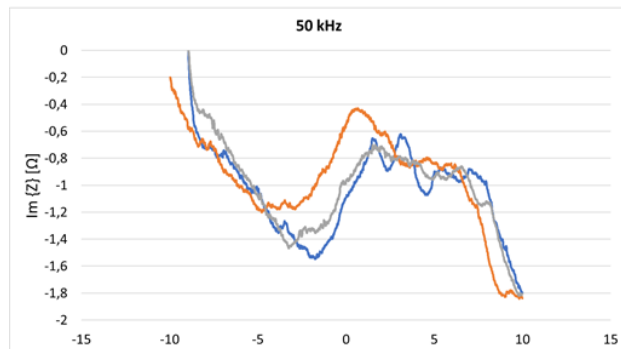
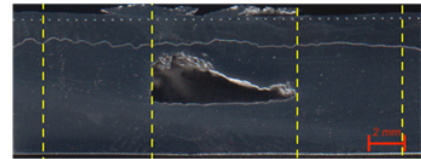
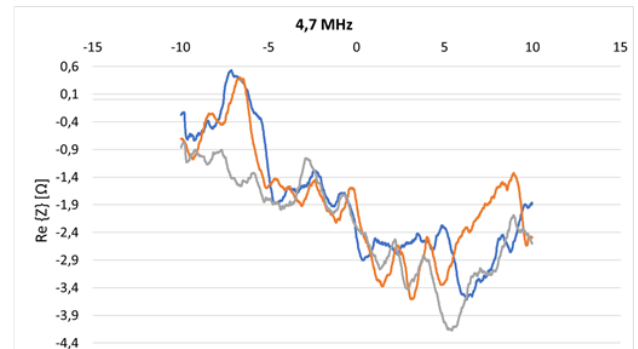
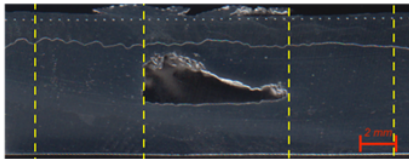
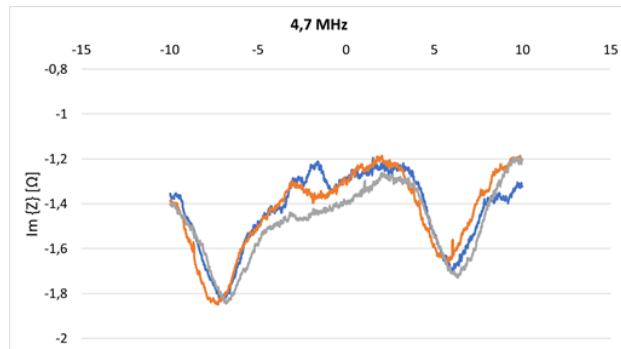
ANEXOS

Anexo 1

Anexo 1.1 – Resultados da inspeção por correntes induzidas relativos à amostra A5_71_450, com leituras no eixo real e imaginário. Para S1, S2, S3 e S4.



Anexo 1.2 – Resultados da inspeção por correntes induzidas relativos à amostra A2_71_450, com leituras no eixo real e imaginário. Para S1e S2.



Anexo 2

Anexo 2- Valores de rugosidade medidos por um rugosímetro.

		Parâmetros	1º ensaio	2º ensaio	3º ensaio	resumo
A5_71_450	Lado em avanço	Ra (μm)	2,394	2,824	2,675	2,631
		Rq (μm)	2,966	3,690	3,319	-
		Rz (μm)	11,534	16,442	14,008	-
		Rmax (μm)	14,646	27,035	18,102	27,035
	Base	Ra (μm)	12,179	11,864	12,330	12,124
		Rq (μm)	13,883	13,731	14,119	-
		Rz (μm)	48,449	51,234	49,007	-
		Rmax (μm)	50,657	59,861	58,344	59,861
B5_71_450	Lado em avanço	Ra (μm)	2,863	3,581	3,577	3,340
		Rq (μm)	3,445	4,532	4,731	-
		Rz (μm)	12,636	17,613	21,015	-
		Rmax (μm)	20,533	22,784	25,496	25,496
	Base	Ra (μm)	10,269	12,204	12,112	11,528
		Rq (μm)	12,151	14,747	14,142	-
		Rz (μm)	46,821	53,995	53,189	-
		Rmax (μm)	52,000	80,744	69,121	80,744
A2_71_900	Base	Ra (μm)	15,661	13,684	14,965	14,770
		Rq (μm)	19,417	16,634	18,358	-
		Rz (μm)	78,897	65,166	71,421	-
		Rmax (μm)	89,722	73,659	87,344	89,722
B2_71_900	Base	Ra (μm)	8,995	7,808	8,890	8,564
		Rq (μm)	11,486	9,764	10,944	-
		Rz (μm)	48,503	38,511	42,524	-
		Rmax (μm)	60,667	45,160	53,473	60,667